

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet Strojarsstva i brodogradnje

# DIPLOMSKI RAD

Tomislav Kolman

Zagreb, 2009.

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet Strojарstva i brodogradnje

# **D I P L O M S K I      R A D**

Mentor

Prof.dr.sc. Damir Ciglar

Tomislav Kolman

Zagreb, 2009.

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam rad radio samostalno koristeći znanje stečeno tijekom studija i nevedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru Prof. dr.sc. Damiru Ciglaru na pomoći pri izradi rada. Ujedno zahvaljujem se djevojci Mateji na pruženoj potpori tokom diplomiranja i pomoći pri uklanjanju grešaka nastalih tokom pisanja ovog rada. Također hvala roditeljima koji su mi omogućili studiranje koje će mi sigurno ostati u lijepom sjećanju.

Tomislav Kolman

## SAŽETAK

Brušenje je vrlo značajan postupak obrade odvajanjem čestica koji je oduvijek poznat po svojoj točnosti i kvaliteti obrađene površine. U prošlosti brušenje se koristilo samo kod završne obrade za dobivanje visoke kvalitete, no razvojem tehnologija i novih materijala, brušenje dobiva novu dimenziju obrade odvajanjem čestica, a to je visoka proizvodnost. Tako danas postoji širok spektar postupaka obrade odvajanjem čestica koji istovremeno postižu visoku kvalitetu i visoku proizvodnost, pa sama primjena pojedinih postupka postaje neodređena.

U ovom radu bit će navedeni i opisani neki suvremeni postupci brušenja orijentirani na povećanje proizvodnosti. Detaljnije će biti opisan postupak dubokog brušenja, te će se za konkretnu brusilicu eksperimentalno odrediti granična proizvodnost, odnosno granični učin brušenja s obzirom na reznu površinu brusa za dva različita materijala obratka. Granični reducirani učin brušenja  $Q_{gr-br}$ , predstavlja vrijednost reduciranog učina brušenja kod kojeg još ne dolazi do neispravnog brušenja i kod kojeg ne nastaju pogreške brušenja, a njegova se vrijednost može odrediti samo provođenjem eksperimenta.

## POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz proizvodnje alatnih strojeva u Njemačkoj za 2006. Godinu.....	1
Slika 2. Prodaja Okuma alatnih strojeva za 2006. Godinu.....	2
Slika 3. Primjer obodnog ravnog brušenja i sastav rezne površine .....	3
Slika 4. Princip nastanka odvojene čestice.....	4
Slika 5. Sile kod brušenja.....	4
Slika 6. Reducirani učin brušenja.....	6
Slika 7. Struktura brusa.....	7
Slika 8. Primjer označavanja brusne ploče.....	8
Slika 9. Usporedba klasičnog i S-G brusnih zrna.....	9
Slika 10. CBN brusna zrna.....	10
Slika 11. CBN brusna zrna s prevlakom.....	10
Slika 12. Tvrdća materijala po Knoop-u.....	10
Slika 13. Prikaz alata za obradu rezne površine brusa.....	11
Slika 14. Prikaz postupka obrade rezne površine brusa.....	12
Slika 15. Rolice s dijamantnom prevlakom.....	13
Slika 16. Tlačna rolica sauređajem.....	13
Slika 17. Blok s dijamantnom rolicom.....	14
Slika 18. Touch-dressing metoda obrade rezne površine.....	14
Slika 19. Vreteno za obradu superabraziva .....	15
Slika 20. Osnovni utjecajni čimbenici na proces brušenja.....	16
Slika 21. Razvoj brušenja.....	17
Slika 22. Primjer dubokog brušenja.....	18
Slika 23. Brusilica za duboko brušenje.....	19
Slika 24. Karakteristike brušenja uz povišenje brzine rezanja.....	20
Slika 25. Visokobrzinska kružna brusilica za obradu bez šiljaka.....	21
Slika 26. Diskontinuirana obrada reznom rolicom .....	22

Slika 27. Kontinuirana obrada reznom rolicom.....	22
Slika 28. Karauselna brusilica sa konstantnom obradom rezne površine brusa.....	23
Slika 29. Visokobrzinsko brušenje.....	24
Slika 30. Grind-hardening postupak brušenja.....	25
Slika 31. Brusilica za ravno obodno brušenje, Stanko Import.....	27
Slika 32. Uzorci.....	28
Slika 33. Teoretska najveća hrapavost rezne površine brusa.....	30
Slika 34. Uređaj za mjerenje hrapavosti.....	31
Slika 35. Stezanje obratka na stol stroja.....	33
Slika 36. Granična proizvodnost 1.2842 čelika pri konstantnoj posmičnoj brzini od 1.75 m/min.....	34
Slika 37. Granična proizvodnost 1.2080 čelika pri konstantnoj posmičnoj brzini od 1.75 m/min.....	34
Slika 38. Površina obratka bez pogreška brušenja.....	35
Slika 39. Površina obratka sa pogreškama brušenja.....	35
Slika 40. Granična proizvodnost pri konstantnoj dubini brušenja i promjenjivoj posmičnoj brzini za čelik 1.2842.....	37
Slika 41. Granična proizvodnost pri konstantnoj dubini brušenja i promjenjivoj posmičnoj brzini za čelik 1.2080.....	37
Slika 42. Obradak pri najvećim režimima obrade.....	38
Slika 43. Granična proizvodnost 1.2842 čelika pri konstantnoj posmičnoj brzini od 1.75 m/min.....	40
Slika 44. Granična proizvodnost 1.2080 čelika pri konstantnoj posmičnoj brzini od 1.75 m/min.....	41
Slika 45. Granična proizvodnost pri konstantnoj dubini brušenja i promjenjivoj posmičnoj brzini za čelik 1.2842.....	42
Slika 46. Granična proizvodnost pri konstantnoj dubini brušenja i promjenjivoj posmičnoj brzini za čelik 1.2080.....	43

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Prosječni kemijski sastav čelika 1.2842.....	28
Tablica 2. Prosječni kemijski sastav čelika 1.2080.....	29
Tablica 3. Srednja aritmetička hrapavost uz konstantnu posmičnu brzinu i promjenjivu dubinu brušenja.....	33
Tablica 4. Srednja aritmetička hrapavost uz konstantnu dubinu brušenja i promjenjivu posmičnu brzinu brušenja.....	36
Tablica 5. Srednja aritmetička hrapavost uz konstantnu posmičnu brzinu i promjenjivu dubinu brušenja.....	40
Tablica 6. Srednja aritmetička hrapavost uz konstantnu dubinu brušenja i promjenjivu posmičnu brzinu brušenja.....	42
Tablica 7. Granični reducirani učini brušenja dobiveni istraživanjem.....	44

## SADRŽAJ

Sažetak.....	I
Popis slika.....	II
Popis tablica.....	IV
1. UVOD.....	1
1.1. Općenito o brušenju.....	3
1.1.1. Princip nastanka odvojene čestice.....	4
1.1.2. Sile kod brušenja.....	4
1.1.3. Pretvorba energije u procesu brušenja.....	5
1.2. Proizvodnost postupka brušenja.....	5
1.3. Alati za brušenje.....	7
1.3.1. Konvencionalni brusevi.....	7
1.3.2. Super-abrazivi ( CBN i PCD).....	9
1.4. Obrada rezne površine konvencionalnih bruseva.....	11
1.5. Obrada rezne površine super-abraziva.....	14
2. SUVREMENI POSTUPCI BRUŠENJA.....	16
2.1. Duboko brušenje.....	18
2.2. Visokobrzinsko brušenje.....	20
2.3. Brušenje s konstantnom obradom rezne površine brusa.....	22
2.4. Visokobrzinsko brušenje super-abrazivima .....	24
2.5. Visokoučinsko brušenje.....	25
2.6. Kaljenje brušenjem .....	25
3. SREDSTVA I UVJETI ISPITIVANJE.....	27
3.1. Brusilica.....	27
3.2. Izbor materijala uzoraka.....	28
3.3. Izbor brusne ploče.....	29
3.4. Obrada rezne površine brusa.....	30
3.5. Uređaj za mjerenje hrapavosti.....	31
4. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE.....	32
4.1. Određivanje graničnog učina brušenja sa vrlo grubom reznom površinom brusa.....	32

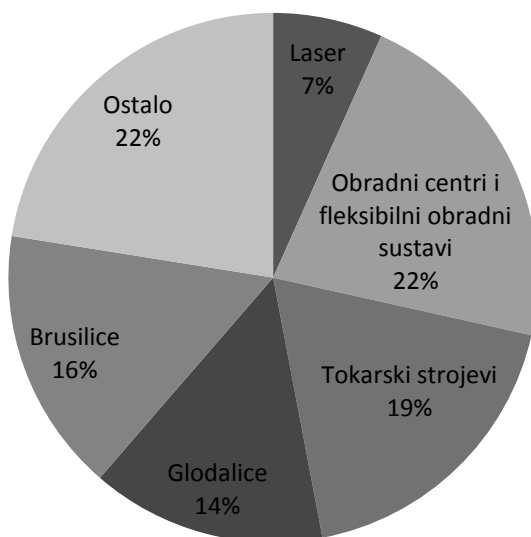


4.1.1. Određivanje graničnog učina brušenja uz uvjet konstantne posmične brzine s mjenjanjem parametara dubine rezanja.....	33
4.1.2. Određivanje graničnog učina brušenja uz konstantnu dubinu brušenja s mjenjanjem posmične brzine.....	36
4.2. Određivanje graničnog učina brušenja sa fino obrađenom reznom površinom brusa.....	39
4.2.1. Određivanje graničnog učina brušenja uz uvjet konstantne posmične brzine s mjenjanjem parametara dubine rezanja.....	40
4.2.2. Određivanje graničnog učina brušenja uz konstantnu dubinu brušenja s mjenjanjem posmične brzine.....	42
5. ZAKLJUČAK.....	45
6. LITERATURA.....	46

## 1. UVOD

Proizvodnja je danas poznata kao važna društvena djelatnost. Biti konkurentan u proizvodnji od velikog je značaja za društvo. Napredak, odnosno razvoj tvrtke, omogućen je ako je ona konkurentna na tržištu, to jest ako proizvodi proizvode koji zadovoljavaju zahtjeve tržišta, a pri tome su bolji od drugih proizvoda. Danas je jako teško biti konkurentan na tržištu. Prije svega, razlog je taj što je ono veliko, a zahtjevi tržišta su visoki. Iz razloga da bi se mogli nositi sa konkurencijom, odnosno da bi mogli biti bolji od nje moramo ulagati u nova znanja i nove tehnologije koja će nam to i omogućiti. Zato danas sve industrijski razvijene zemlje mnogo ulažu u istraživanje i razvoj novih suvremenih tehnologija kako bi i one same bile konkurentne na međunarodnoj razini te doprinijele daljnjem razvitku društva. Najveći napredak u tehnologiji ostvaren je razvojem računala. Danas su računala zastupljena u svim suvremenim granama tehnologije s ciljem pojednostavljenja i lakšeg pristupa procesu.

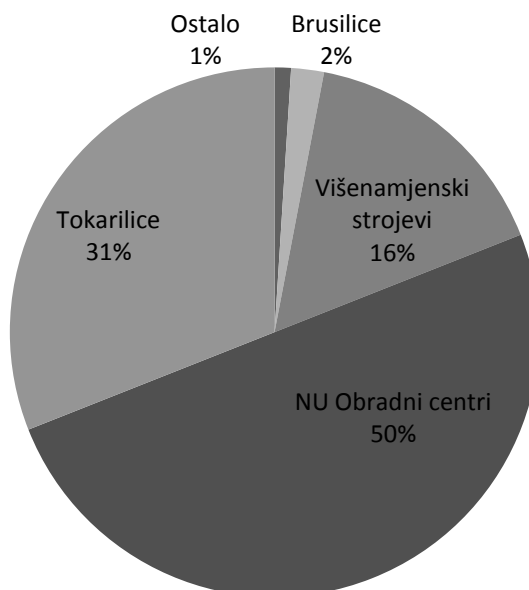
Iako se u novije vrijeme postupci brušenja zamjenjuju postupcima obrade odvajanjem čestica sa geometrijski definiranim alatima, što je omogućeno razvojem novih tehnologija i materijala alata, brušenje će i dalje zauzimati važnu poziciju u obradi odvajanjem čestica i u nekim područjima biti će nezamjenjivo. Na sajmu EMO '07 u Hannoveru, koji je među najvećim svjetskim sajmovima alatnih strojeva i prateće industrije, vodeća industrijska udruga u području obrade metala VDW iznijela je statistiku o proizvodnji alatnih strojeva po vrstama u Njemačkoj za 2006. godinu; slika 1.



Slika 1. Prikaz proizvodnje alatnih strojeva u Njemačkoj za 2006. godinu [1]

Iz slike 1 se vidi da je udio proizvodnje brusilica prema proizvodnji ostalih vrsta alatnih strojeva dosta velik. Uzimajući u obzir da je jedna numerički upravljana brusilica približno 2,5 puta skuplja od jedne numerički upravljane tokarilice istih dimenzija, podatak je to značajniji.

Osim navedenoga primjera iz Njemačke dan je i primjer iz Japana. Na seminaru japanskog proizvođača alatnih strojeva Okuma, koji je održan na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u lipnju 2007. godine, dani su podaci slijedeći o prodaji Okuma alatnih strojeva u 2006 godini, slika 2.



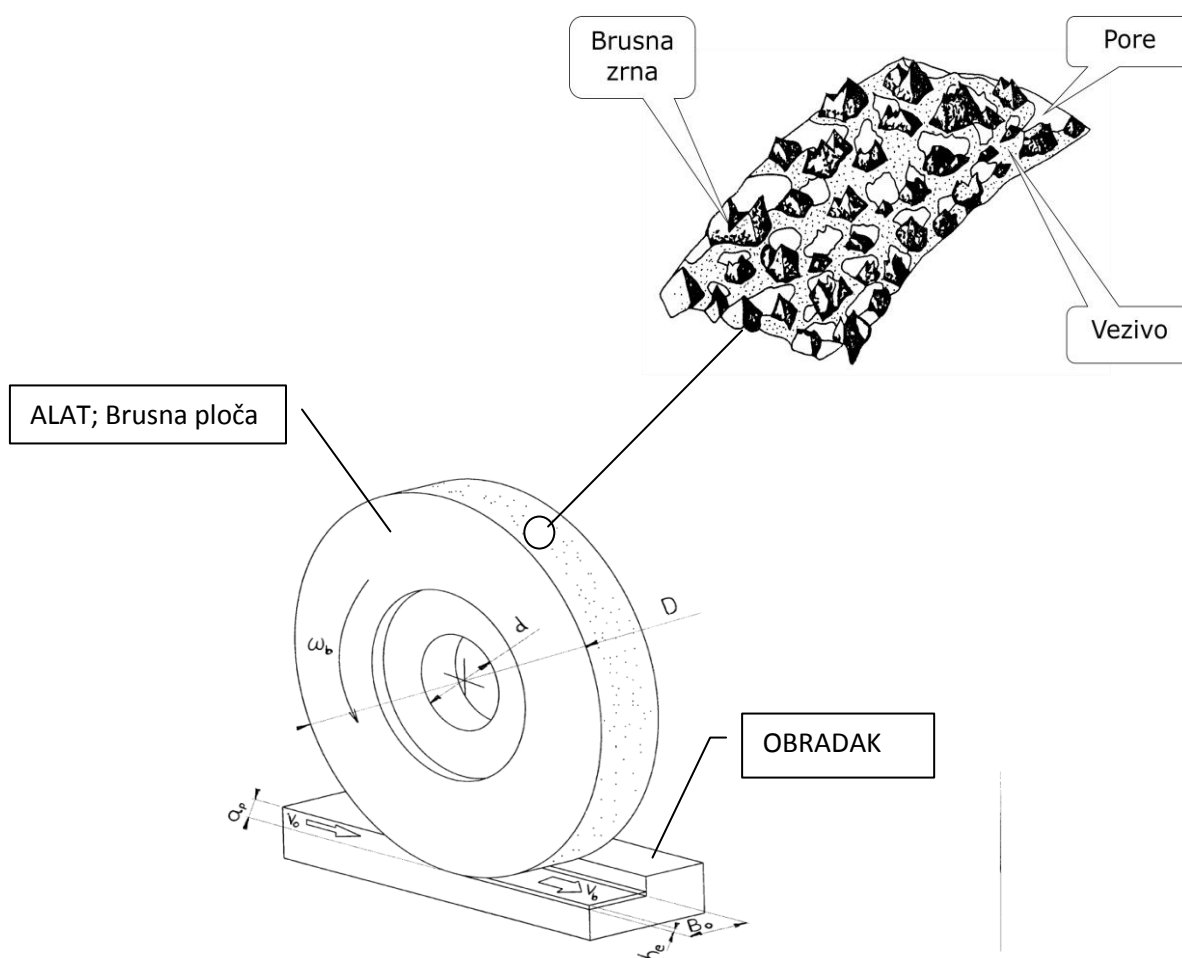
Slika 2. Prodaja Okuma alatnih strojeva u 2006 godini[2]

Iz slike 2. može se zaključiti da i nije previše brusilica prodano, odnosno da se baš i ne koriste u proizvodnji. No na temelju tog podatka ne može se prosuđivati o udjelu brusilica u proizvodnji jer sama tvrtka nema veliku ponudu brusilica te ima svega dva modela istih za razliku od ostalih vrsta strojeva koje nude u mnogo više modela, točnije imaju veću ponudu. Kao pravi pokazatelj prisustva brusilica u proizvodnji govori podatak o broju instaliranih brusilica u njihovoj tvornici u Japanu. Tvornica ima 88 numerički upravljanih obradnih centara, 48 numerički upravljanih tokarilica i 66 numerički upravljanih brusilica. Na temelju tog podatka vidi se velika zastupljenost brusilica u proizvodnji alatnih strojeva.

Razvojem tehnologija s ciljem da se što više operacija vrši na jednom stroju, osim što su se unaprijedili postupci obrade sa geometrijski definiranim alatima kao što su tokarenje, glodanje, bušenje i sl., tako se je unaprijedilo i brušenje kao postupak kod kojeg alat nije geometrijski definiran. Tako je danas na jednoj brusilici moguće izvoditi grubu i finu obradu. To je jedan od razloga zašto brušenje ima svoju budućnost.

## 1.1 OPĆENITO O BRUŠENJU

Brušenje je opći naziv za postupak obrade odvajanjem čestica kod kojeg se alat sastoji od većeg broja nejednoliko raspoređenih oštrica, neujednačene i nedefinirane rezne geometrije. Proces se vrši na strojevima pod zajedničkim imenom brusilica. Glavno gibanje je kružno kontinuirano, a vrši ga alat, dok posmično gibanje vrši obradak, a ovisi o samom postupku brušenja. Ono može biti kružno, linearno ili kombinirano. Na slici 3. prikazan je postupak obodnog ravnog brušenja i sastav rezne površine brusa koja je u zahvatu s obratkom.

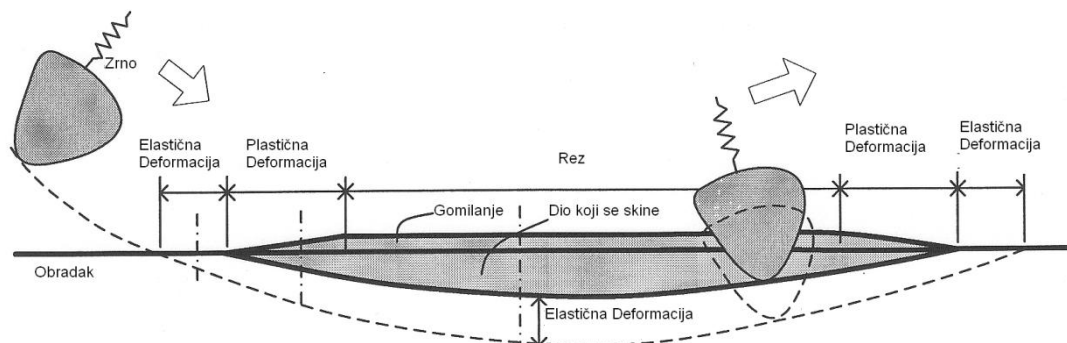


Slika 3. Primjer obodnog ravnog brušenja i sastav rezne površine brusa[2]

Postupak brušenja se obično koristi pri završnim obradama tvrdih ili otvrdnutih materijala s ciljem poboljšanja kvalitete obrađene površine i smanjenja tolerancija.

### 1.1.1. PRINCIP NASTANKA ODVOJENE ČESTICE

Na slici 4 prikazan je princip nastanka odvojene čestice kod postupka brušenja. Odvojene čestice nastaju kada prestanu elastične deformacije rezne površine brusa i obratka, a počnu plastične deformacije brušene površine.



Slika 4. Princip nastanka odvojene čestice[3]

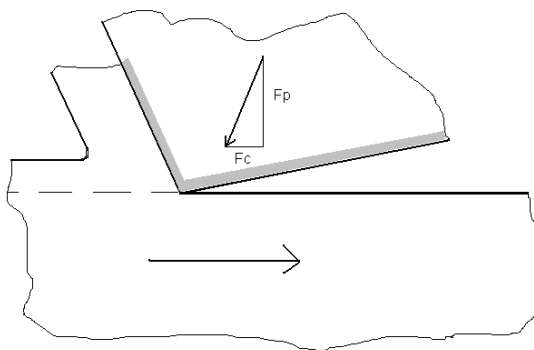
Samo najstajanje odvojene čestice odvija se uz tri glavne interakcije između brusa i obratka. **REZANJE** koje stvara odvojenu česticu na prednoj površini brusa, **KLIZANJE** brusa tj. brusnih zrna po obratku koje stvara toplinu kroz trenje i **PLASTIČNE DEFORMACIJE** koja tjera materijal ispred i sa strane brusnog zrna.

### 1.1.2. SILE KOD BRUŠENJA

Kod brušenja kao i kod drugih postupaka obrade odvajanjem čestica javljaju se sile kao otpor materijala obratka prema prodiranju u njegovu strukturu. Na slici 5 su prikazane sile brušenja na reznom zrnju. Vidljivo je da je zbog elastičnih deformacija i nepovoljnog prednjeg kuta oštrice brusnog zrna odnos sila  $F_p > F_c$ .

$F_c$  - glavna sila

$F_p$  – natražna, odzivna ili pasivna sila



Slika 5. Sile kod brušenja[2]

### 1.1.3. PRETVORBA ENERGIJE U PROCESU BRUŠENJA

Kod procesa brušenja javlja se mehanička energija kao posljedica relativnog gibanja između alata i obratka. Ta se energija najvećim djelom pretvara u toplinsku energiju zbog javljanja trenja između alata i obratka te deformacija istih. Ako je udio trenja manji, proces je povoljniji jer se razvija manje topline. Kao posljedica te toplinske energije povećava se temperatura u zoni brušenja što za posljedice može imati pogreške brušenja. Te pogreške na obratku mogu ostaviti mjerljive posljedice kao što su: promjena mikrostrukture, promjena tvrdoće, pojavu pukotina, spaljivanje površine, zaostala naprezanja... Kako bi se smanjila temperatura u zoni brušenja treba obratiti pažnju na sljedeće:

- odabir kvalitetne brusne ploče koja neće biti pretvrda kako bi tupo zrno lakše ispalo s rezne površine brusa
- poroznija brusna ploča omogućuje bolji protok SHIP-a do zone brušenja
- pravovremena i kvalitetna obrada rezne površine brusa
- podešavanje brzina i posmaka
- točno dovodenje SHIP-a što bliže zoni brušenja

### 1.2. PROIZVODNOST POSTUPKA BRUŠENJA

Proizvodnost postupka brušenja prikazuje se pomoću reduciranog učina brušenja koji pokazuje količinu izbrušenog materijala u jedinici vremena, ali po jedinici širine brusnog zahvata. Izraz za reducirani učin brušenja glasi:

$$Q_{br} = a_p \cdot v_o, \text{ m}^3/\text{s m} \quad (1)$$

gdje je:

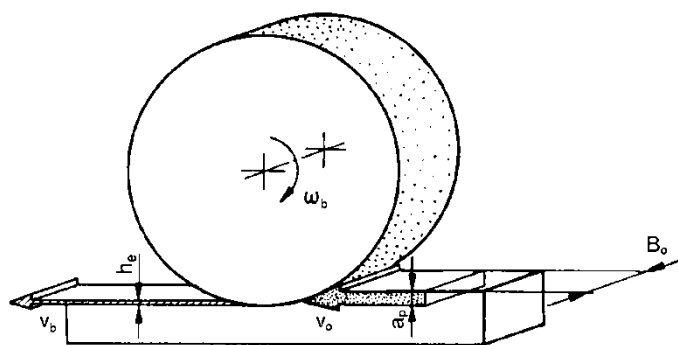
$Q_{br}$	- reducirani učin brušenja;
$a_p$	- dubina brušenja;
$v_o$	- brzina obradne površine.

Reducirani učin brušenja  $Q_{br}$  je prema slici 6 količina materijala koja ulazi u brusni zahvat. Ako se brušenje promatra kao prijenos materijala reznom površinom brusa, onda mora biti zadovoljeno da je reducirani učin brušenja jednak količini materijala koji će oštrice na reznj površini brusa odrezati, smjestiti u prostor za smještaj čestica na reznj površini brusa i prenjeti iz luka zahvata preko rezne površine brusa. Ta izlazna količina materijala jednaka je ulaznoj, a definirana je umnoškom ekvivalentne debljine brušenja i obodne brzine brusa. Izraz za reducirani učin brušenja tada glasi:

$$Q_{br} = a_p \cdot v_o = h_e \cdot v_b \quad , \text{ m}^3/\text{s m} \quad (2)$$

gdje je:  $h_e$  - ekvivalentna debljina brušenja;

$v_b$  - obodna brzina brusa.



Slika 6.Reducirani učin brušenja [4]

Iz izraza (2) je vidljivo da se povećanje proizvodnosti postupka brušenja odnosno reduciranog učina brušenja može ostvariti povećanjem dubine brušenja, brzine obradne površine, obodne brzine brusa i ekvivalentne debljine brušenja. Ako je u postupku brušenja vrijednost reduciranog učina brušenja prevelika, dolazi do neispravnog brušenja. Granični reducirani učin brušenja  $Q_{g-br}$ , predstavlja vrijednost reduciranog učina brušenja kod kojeg još ne dolazi do neispravnog brušenja i kod kojeg ne nastaju pogreške brušenja. Dakle kod ispravnog postupka brušenja mora biti zadovoljeno slijedeće:

$$Q_{br} < Q_{g-br}$$

Na vrijednost graničnog reduciranog učina brušenja između ostaloga utječu materijal obratka i njegovo stanje, specifikacija brusa, prostor za smještaj odvojenih čestica, način i uvjeti obrade rezne površine brusa, duljina luka zahvata, režimi brušenja, način brušenja, količina, vrsta i način dovođenja sredstva za hlađenje ispiranje i podmazivanje (SHIP-a), krutost brusnog sustava, oblik obratka i drugo. Vidljivo je iz prethodnog da se granični reducirani učin brušenja  $Q_{g-br}$  može odrediti samo eksperimentalnim ispitivanjem jer njegova vrijednost ovisi o mnogo utjecajnih čimbenika i promjenom bilo kojeg od njih vrijednost mu se mijenja.

### 1.3. ALATI ZA BRUŠENJE

Rezni alat u procesu brušenja je brusna ploča ili brus, a sastoji se od mnoštva abrazivnih čestica koje su zapravo oštrice. Brus možemo podijeliti u dvije skupine:

- Konvencionalni brusevi
- Superabrazivi (PCD i CBN)

#### 1.3.1. KONVENCIONALNI BRUSEVI

Prema literaturi [4] konvencionalni brus se sastoji od:

- Brusnih zrna
- Veziva
- Pora

Sve tri komponente zajedno čine strukturu brusa. Tako razlikujemo zatvorenu, otvorenu i visokoporoznu strukturu brusa, slika 7. Rezna površina može u jednom prolazu skinuti toliki volumen čestica koliki stane u prostor između oštrica na reznoj površini brusa. Dakle, s otvorenijom strukturom brusa može se skinuti više materijala u jednom prolazu jer otvorenija struktura ima više pora i više prostora između brusnih zrnca za smještaj odvojenih čestica, a ujedno takva struktura omogućava bolji protok sredstva za hlađenje do mjesta brušenja.



Slika 7. Struktura brusa [5]

Za razliku od alata sa definiranom geometrijom poput glodala, tokarskog noža, svrdla i sl., brus ima nedefiniranu geometriju. Razlog je u tome što su nejednolika zrna različito raspoređena u vezivu. Uz to, karakteristika brusa je i negativni prednji kut oštrice koji se kreće od  $-45^\circ$  do  $-80^\circ$ .

Materijal brusnih zrna kod konvencionalnih bruseva bira se s obzirom na vrstu i stanje materijala obratka, tako razlikujemo:

- Korund
- Elektrokorund
- Silicij-karbid



Osnovni materijal za dobivanje normalnog i poluplemenitog korunda je boksit, a za plemeniti korund čista bijela glinica. Kvaliteta brusnih zrna je određena: mikrotvrdoćom, lomljivošću i reznim oblikom.

Vezivo mora čvrsto obuhvatiti brusna zrna te ih nakon zatupljenja olabaviti kako bi ona pod utjecajem centrifugalne sile ili SHIP-a mogla napustiti reznu površinu i tako aktivirati nova zrna niže razine. S obzirom na vrstu dijelimo ih na organska (prirodna i umjetna) i anorganska (keramičko, mineralno i metalno).

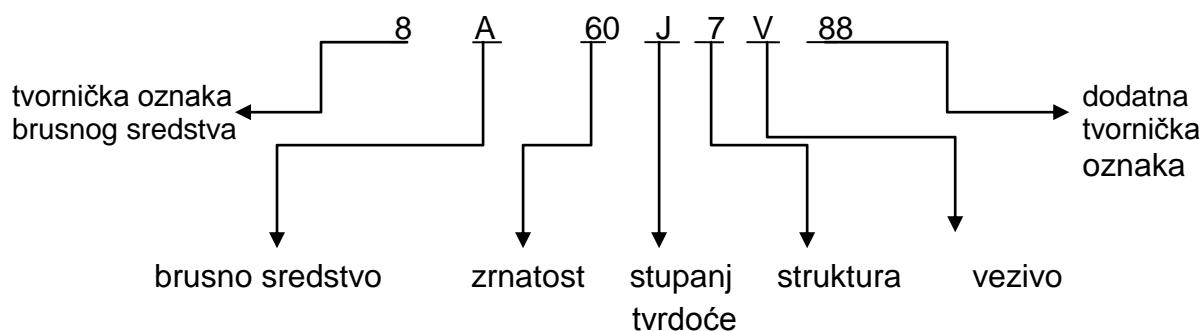
Poroznost karakterizira strukturu brusa i ima veliko značenje u procesu brušenja. Pore služe za smještaj odvojenih čestica te za transport sredstva za hlađenje u prostor reznog mjesta. Prirodna poroznost koja se normalno javlja pri izradi brusa može se povećati specijalnim dodacima koji stvaraju dopunske pore. Tako nastaje otvorena struktura brusa.

Stupanj tvrdoće definiran je kao otpor veziva prema izbijanju sredstva iz rezne površine brusa u procesu brušenja. Ovisi o količini i vrsti veziva, strukturi, vrsti brusnog zrna i samoj tehnologiji izrade brusnog zrna. Tvrdoća je podjeljena u nekoliko razreda, a označuje se abecednim redom od A do Z, pri čemu je A najniži, a Z najviši stupanj tvrdoće.

Zrnatost se označava brojčanom vrijednošću koja predstavlja broj očica na 1 inch duljine sita kroz koje je prošlo osnovno sredstvo u procesu separacije i zadržalo se na prvom slijedećem situ. Tako razlikujemo gruba, srednja, fina i vrlo fina zrna.

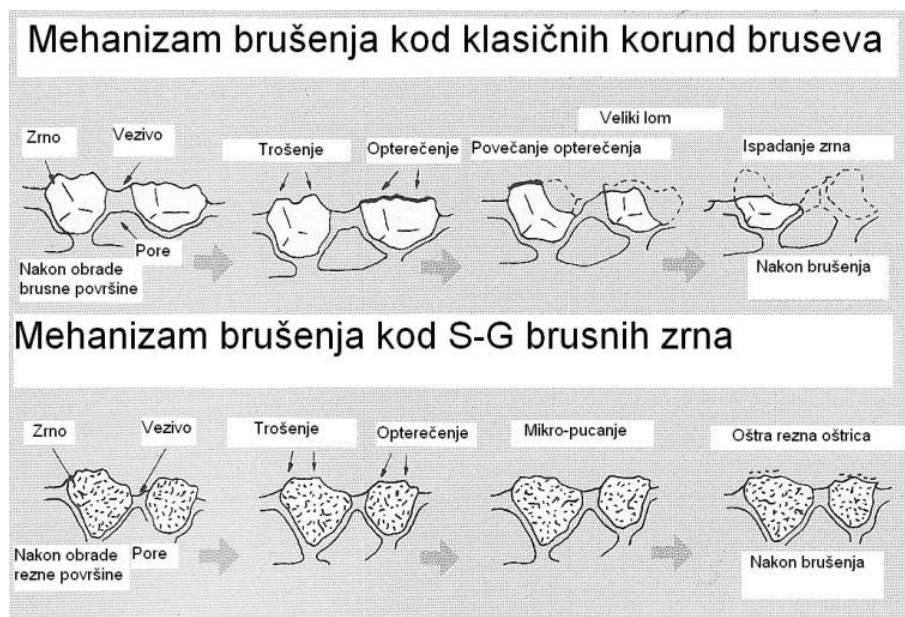
Sve gore navedene karakteristike brusa važne su jer uvelike utječu na proces brušenja. Za konkretne uvjete obrade brus se odabire tako da se dobije što efikasnije brušenje zadovoljavajući pri tome traženu kvalitetu. Označivanje bruseva je standardizirano i uvelike olakšava snalaženje pri samom odabiru brusa.

Primjer označavanja brusa dan je na slici 8.



Slika 8. Primjer označavanja brusne ploče [4]

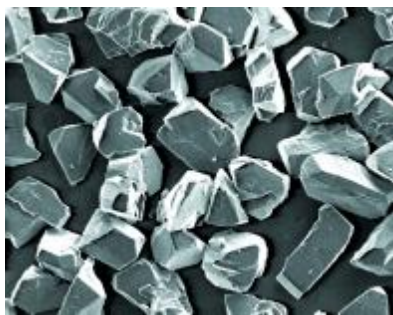
Između konvencionalnih bruseva i super abraziva nalaze se visokoefektivni mikrokristalični  $Al_2O_3$  brusevi. To je mješavina korunda i SOL-GEL brusnih zrna. Što je veći udio S-G brusnih zrna brus je kvalitetniji, ali i skuplji. Karakteristika ovih bruseva je jedinstvena finožrnata mikrostruktura koja povećava lomnu žilavost u odnosu na klasične bruseve, tzv. samooštrenje. Za razliku od klasičnih bruseva, gdje zrno nakon zatupljenja ispada iz brusne ploče, ovdje se tokom obrade zrno lomi, uvijek stvarajući novu oštricu. Takva konstantno oštra struktura brusa omogućuje dulji rad između obrade rezne površine brusa, smanjuje razvoj topline i smanjuje sile brušenja. Na slici 9. prikazan je mehanizam trošenja konvencionalnih i S-G bruseva.



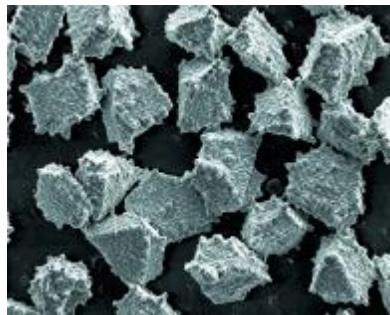
Slika 9. Usporedba klasičnog i S-G brusnih zrna [6]

### 1.3.2. SUPERABRAZIVI

U skupinu superabraziva spada polikristalični dijamant(PCD) i kubični bor nitrid (CBN). Oni su značajni po visokoj tvdoći, čvrstoći, žilavosti, otpornosti na trošenje i toplinskoj vodljivosti u odnosu na konvencionalane bruseve. Sve te značajke čine superabrazive značajno skupljim, no mnogo duži vijek trajanja čini ih vrlo ekonomičnim i pouzdanim. Glavni nedostatak im je slabo vezivo između kristala i matrice. Ono treba biti dovoljno jako da drži kristale prilikom njihovog trošenja i samooštrenja, a kada kristali postanu premali da bi efikasno obavljali rad, vezivo mora omogućiti njihovo otpuštanje i oslobađanje novog kristala na nižoj razini. Da bi vezivo lakše zadržalo zrno u matrici, zrna se presvlače raznim prevlakama poput nikla, titana i sl. Ujedno te prevlake povećavaju vijek trajanja alata, poboljšavaju postojanost geometrije te doprinose odvodu topline iz zone brušenja. Na slici 10. i 11. prikazana su CBN brusna zrna sa i bez prevlake.



Slika 10. CBN brusna zrna[7]

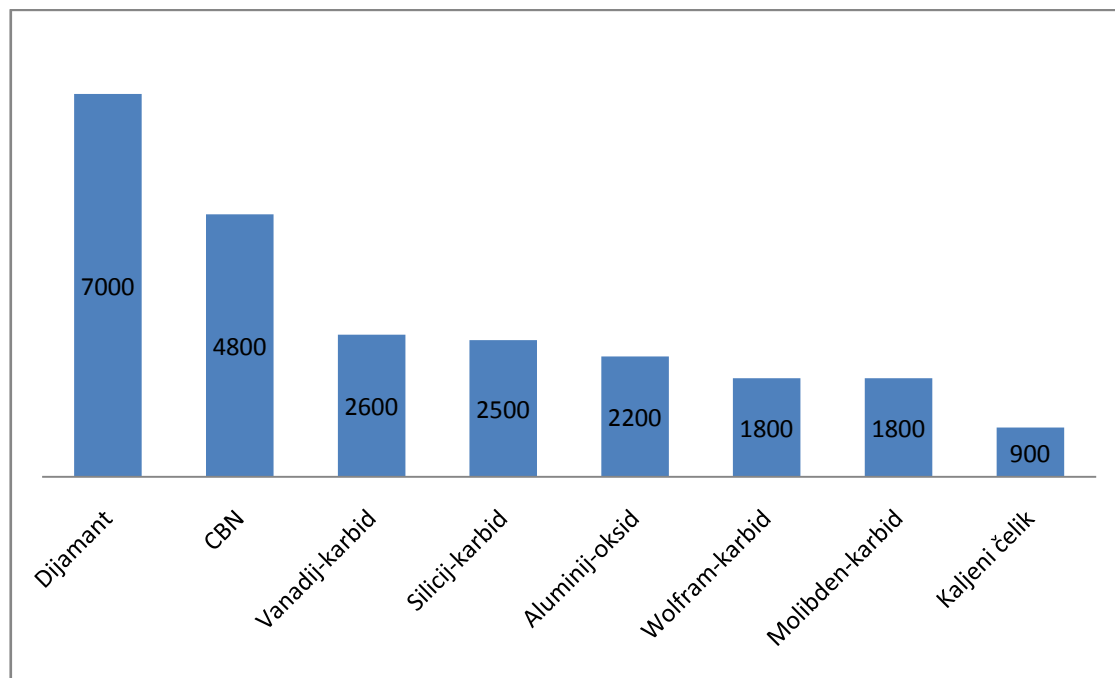


Slika 11. CBN brusna zrna sa prevlakom[7]

Kao veziva koriste se smolna veziva, metalna veziva, keramična veziva. Uz to postoje i superabrazivi bez veziva poznatiji pod imenom jednoslojni brusevi.

Pri izradi PCD-a koriste se prirodni i sintetički dijamanti. Sam dijamant je vrlo tvrda verzija ugljika, a pošto je čelik legura ugljika i željeza on ima veliki afinitet prema željezu pa se troši brže. Zato se koristi kod brušenja neželjeznih materijala, keramike i cermeta. Kako bi dobili osjećaj koliko je pojedini materijal tvrd na slici 12 prikazana je tvrdoća materijala po Knoop-u.

CBN je nešto mekši od dijamanta, no nadasve vrlo tvrd materijal. Koristi se kod obrade vrlo tvrdih željeznih legura, posebno kada je potrebno zadržati istu formu brusne površine dulje vrijeme.



Slika 12. Tvrdoća materijala po Koopu [8]

## 1.4. OBRADA REZNE POVRŠINE KONVENCIONALNIH BRUSEVA

Obrada rezne površine brusa vrši se iz dva glavna razloga, oštrenja i čišćenja rezne površine brusa. Prilikom samog procesa brušenja dolazi do trošenja i zatupljivanja brusnih zrnca stoga je potrebno obraditi reznju površinu brusa, odnosno naoštрити brus. Čišćenje rezne površine brusa vrši se zbog nagomilavanja odvojenih čestica u prostor između oštrica i u pore. Centrifugalnom silom čestice se ne mogu izbaciti pa to povećava trenje koje negativno utječe na proces brušenja.

Obrada brusa je neizbježna i prije samog procesa kada se brus tek stavi na vreteno kako bi se dobio željeni oblik, okruglost i ravnost brusa te željena rezna svojstva. Obrada rezne površine brusa ima veliki utjecaj na proces brušenja jer osim što utječe na ispravnost procesa brušenja utječe i na kvalitetu završne obrade.

Obrada rezne površine brusa izvodi se zbog:

- oštrenja i čišćenja
- postizanja željenog oblika
- okruglosti i ravnosti
- promjene topografije
- postizanja željene hrapavosti

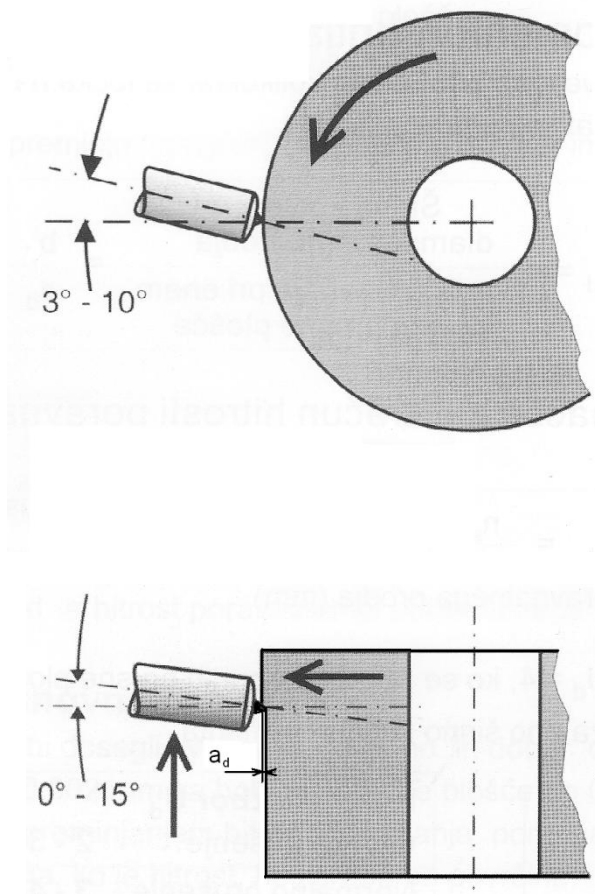
Alati za obradu rezne površine brusa prikazani su na slici 13; a mogu biti:

1. impregnirani dijamant
2. jednozrnati dijamant
3. višezrnati dijamant
4. dijamantna rolica
5. plosnati poravnjivač (dijaleta)



Slika 13. Prikaz alata za obradu rezne površine brusa [9]

Postupak obrade rezne površine brusa s ovim alatima, izvodi se tako da se njima prelazi preko rezne površine brusa određenim pomakom u smjeru osi brusa, a pri svakom prolazu uzima se dubina rezanja, slika 14. Svaki dijamant karakterizira njegova veličina koja se mjeri karatima, ct. Iako su dijamanti međusobno kemijski identični, postoje razlike u tvrdoći. Tvrdoću je moguće ocijeniti po boji dijamanta pa tako bjeli i žuti dijamanti imaju najveću tvrdoću.



Slika 14. Prikaz postupka obrade rezne površine brusa [9]

Osim navedenih alata za obradu rezne površine brusa moguće je još koristiti i sljedeće:

- rollice s dijamantnom prevlakom
- tlačne rollice
- blok s dijamantnom prevlakom

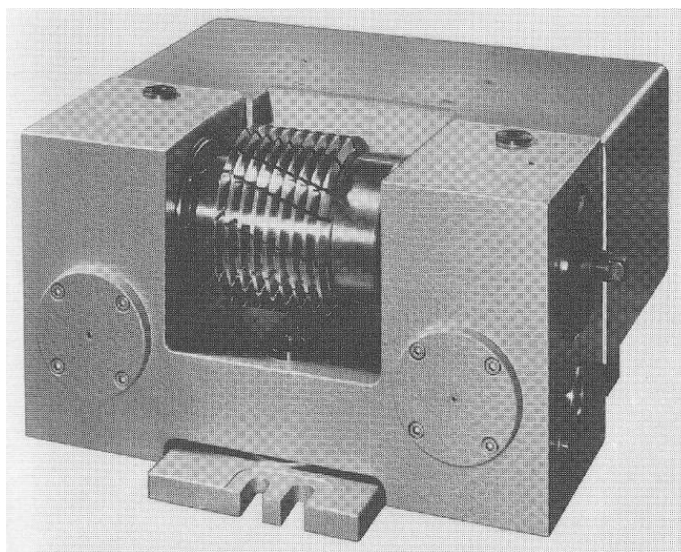
Ove vrste alata se najčešće koristi kod izrade profilnih oblika na reznoj površini brusa, koje se ne mogu drugim jednostavnim postupkom obraditi. Jednom rolicom ili jednim blokom moguće je izrađivati samo jednu vrstu predmeta koji imaju identičan oblik profila kao i rollica ali negativ. Iz tog razloga ovi alati obično se koriste kod serijske proizvodnje, npr. turbinskih lopatica, gdje se visoka cijena tih alata može opravdati. Dijamantne rollice imaju duži vijek trajanja od tlačnih rollica, pa se one koriste za velikoserijsku proizvodnju.

Obrada rezne površine dijamantnom rolicom je kontinuirani postupak, odnosno nema prekida procesa tokom obrade rezne površine brusa. Rolica je smještena iznad brusa na vretenu sa vlastitim pogonom te u zahvatu brusa i rollice dijamantna zrna na rolici odrezuju, drobe i izbacuju brusna zrna iz veziva, stvarajući željeni oblik profila brusa i oštrost rezne površine brusa, slika 15. Dijamantna rolica ima metalnu osnovu na koju se galvaniziranjem nanose zrnca dijamanta.



Slika 15. Rolice s dijamantnom prevlakom [10]

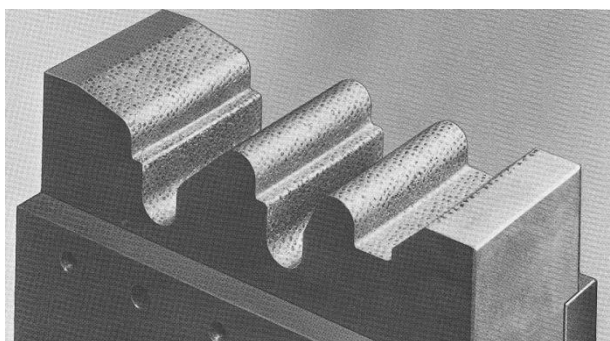
Obrada rezne površine tlačnom rolicom je diskontinuirani postupak, odnosno potrebno je zaustaviti proces brušenja da bi obradili rezu površinu brusa. Karakterističan je po tome da se rolica koja se slobodno vrti utiskuje u brus vlastite frekvencije vrtnje. Zbog tlaka između brusa i rollice, brusna zrna se drobe i izbacuju iz veziva formirajući nove oštrice na profilnoj površini brusa, slika 16. Tlačna rolica se izrađuje iz čelika.



Slika 16. Tlačna rolica sa uređajem [11]



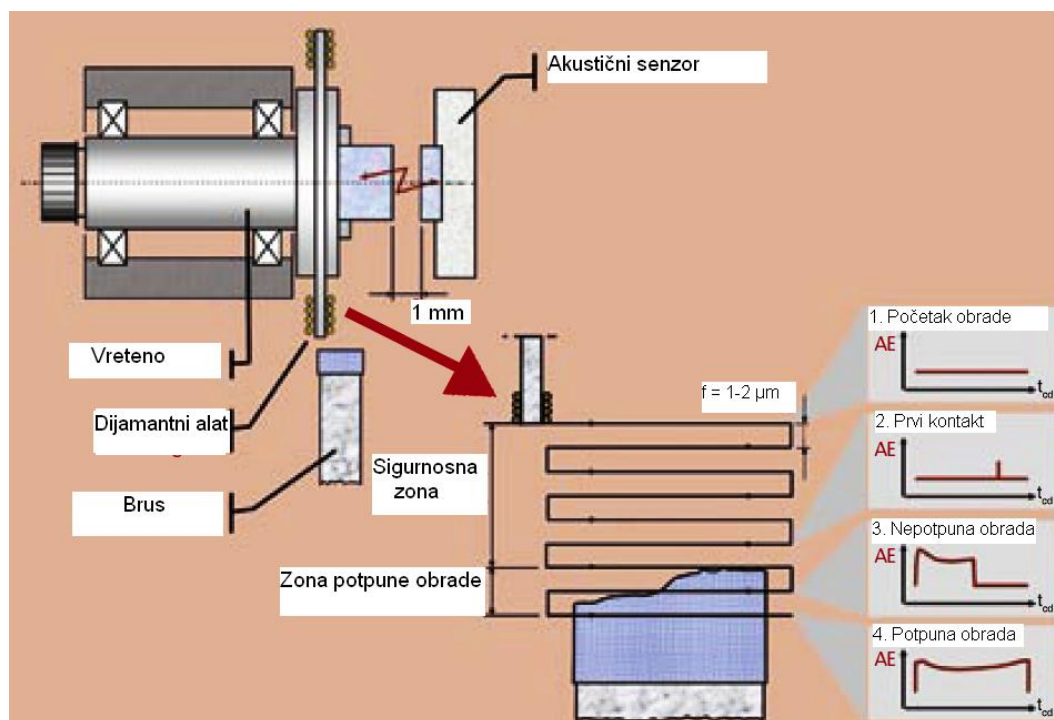
Na slici 17 je prikazan blok s dijamntnom prevlakom koji se također predstavlja diskontinuirani postupak obrade rezne površine brusa. Koristi za profiliranje i oštrenje rezne površine brusa kod brušenja obradaka velikih serija.



Slika 17. Blok s dijamantnom prevlakom [11]

## 1.5. OBRADA REZNE POVRŠINE SUPER-ABRAZIVA

Pojavom prvih CBN bruseva sa keramičkim vezivom obrada rezne površine brusa izvodila se kao i kod konvencionalnih bruseva, no u novije vrijeme praksa je pokazala da ti načini obrade više nisu primjenjivi. Glavni razlog je sama skupoća superabrazivnih bruseva, pa se pri obradi brusa traži minimalna obrada rezne površine s kojom je moguće kvalitetno proizvesti što više proizvoda. Obrada rezne površine izvodi se „touch-dressing“ metodom, gdje se skida svega par mikrometra brusa. Proces je još u razvoju, no na slici 18 dan je šematski prikaz tog postupka.



Slika 18. Touch-dressing metoda obrade rezne površine[12]

Osnovni problem određivanja točke početnog dodira između brusa i dijamantnog alata za obradu brusa kod „touch-dressing“ postupka se rješava pomoću senzora ugrađenog u brus odnosno u osnovu brusa, a kasnija obrada se vrši dok se ne ujednači signal što znači da je rezna površina brusa ravna.

Osim navedenog postupka za obradu CBN i PCD bruseva koristi se i obrada rezne površine konvencionalnim brusevima. Taj postupak služi za otvaranje rezne površine brusa, odnosno za uklanjanje čestica nagomilanih na reznoj površini brusa. Kao naprave koriste zasebna vretena na kojima se nalazi konvencionalni brus obično silicij-karbid, slika 19. Brus rotira vlastitom frekvencijom vrtnje te se njime prelazi preko CBN ili PCD brusa koji također rotira ali u suprotnom smjeru tako da im u mjestu kontakta obodne brzine imaju isti smjer.



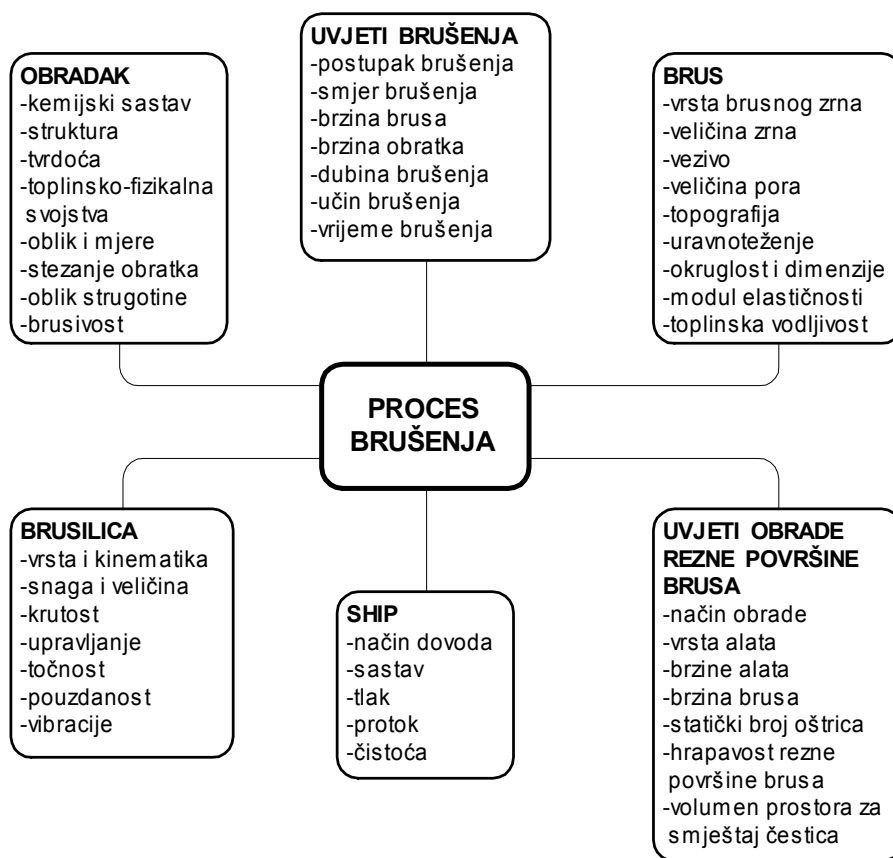
Slika 19. Vreteno za obradu superabraziva [12]



## 2. SUVREMENI POSTUPCI BRUŠENJA

Današnje tržište je sve veće i zahtjevnije pa kako bi se zadovoljilo moraju se razvijati i nove tehnologije. Očiti primjer je autoindustrija u kojoj novi modeli automobila izlaze iz tvornica otprilike svake dvije godine, dok je prije dvadesetak godina to bilo svakih pet godina. Takav napredak omogućen je novim tehnologijama koje olakšavaju i ubrzavaju procese. Samim time doprinosi se i razvoju društva, tako u razvijenim zemljama, koje mnogo ulažu u razvoj i istraživanje novih tehnologija, društvo ima bolji standard od društva u nerazvijenim zemljama.

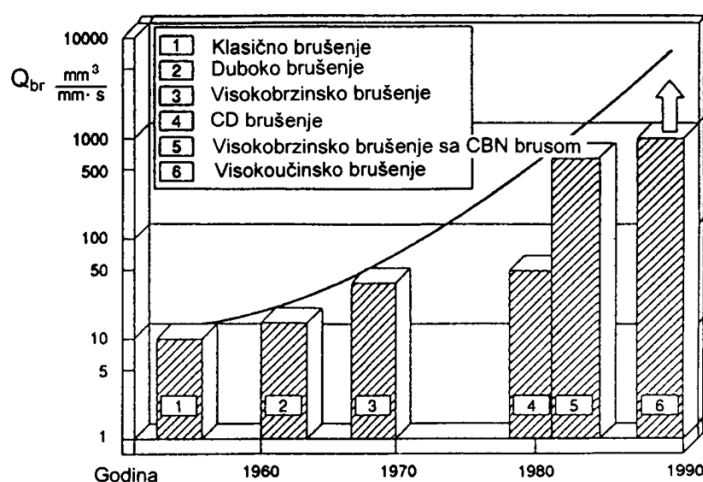
Promatrajući suvremene postupke brušenja, proces brušenja se odvija uz veoma mnogo utjecajnih čimbenika, koji više ili manje utječu na odvijanje i rezultat procesa brušenja, slika 20.



Slika 20. Osnovni utjecajni čimbenici na proces brušenja [13]

Vidljivo je iz slike 20. da utjecajnih čimbenika na proces brušenja ima mnogo, pa se može zaključiti da će budućnost primjene suvremenih postupaka brušenja biti određena daljnjim istraživanjem i razvojem pojedinih čimbenika u toj tehnologiji obrade.

Prema slici 21 brušenje se počelo razvijati šezdesetih godina prošlog stoljeća kada se pojavljuje postupak dubokog brušenja kao novi postupak koji većim dubinama rezanja povećava proizvodnost, odnosno reducirani učin brušenja. Zatim se je razvilo brušenje sa povećanim brzinama rezanja da bi se početkom devedesetih godina kombinacijom ta dva postupka dobilo visokoučinsko brušenje koje je karakteristično po velikim dubinama rezanja i velikim brzinama rezanja. Taj razvoj popraćen je razvojem novih brusnih materijala i samih konstrukcija brusilica koje to omogućavaju.



Slika 21. Razvoj postupaka brušenja [4]

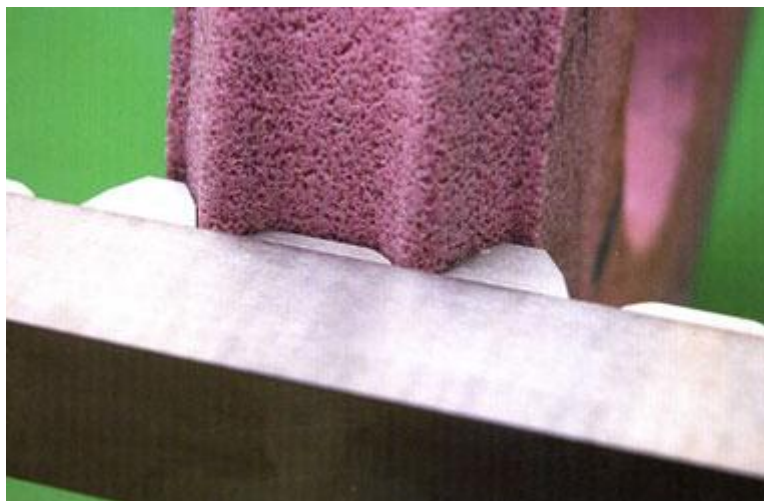
Treba spomenuti još jedan od važnih budućih trendova u obradi brušenjem, a to je primjena postupaka brušenja na brusnim obradnim centrima koji imaju automatsku izmjenu bruseva. Velika je fleksibilnost obrade takvih strojeva, a njihov autonoman rad omogućuje napredni sustav nadzora i dijagnostike procesa brušenja. Taj sustav je neophodan da bi se odredile nepravilnosti u procesu brušenja i sama neispravnost postupka brušenja, a također da bi se postupak mogao optimirati.

Vrlo male dimenzije odvojene čestice, samooštrenje brusa, mogućnost oštrenja alata na stroju bez skidanja alata (i to vrlo jednostavnim postupkom što nije slučaj kod ostalih obrada odvajanjem čestica), visoka točnost uz istodobno postizanje kvalitetne obrađene površine bitne su značajke koje mogu osigurati budućnost suvremenim postupcima abrazivne obrade.

## 2.1. DUBOKO BRUŠENJE

Duboko brušenje (Creap feed grinding) karakterizira velika dubina brušenja i mala brzina obradne površine. Brzina rezanja za konvencionalne bruseve kreće se oko 30-40 m/s. Obrada se vrši najčešće u jednom prolazu, ili kad se zahtijeva točnija izrada u dva prolaza. Najviše materijala se skine u prvom prolazu ostavljajući 0,02 – 0,05 mm za završni prolaz. Dubine brušenja mogu ići do 30 mm što ovisi o snazi brusilice. Slika 22 prikazuje primjer profilnog dubokog brušenja.

Duboko brušenje zasniva se na dugačkom luku zahvata, a to znači da su odvojena čestica i sredstvo za hlađenje dugo u zahvatu između brusa i obratka. Iz tog razloga kod dubokog brušenja koriste se visokoporozne brusne ploče koje omogućuju smiještaj odvojene čestice i prijenos sredstva za hlađenje. No uz poroznost postoji još niz drugih varijabli kada se odabire brus za duboko brušenje.

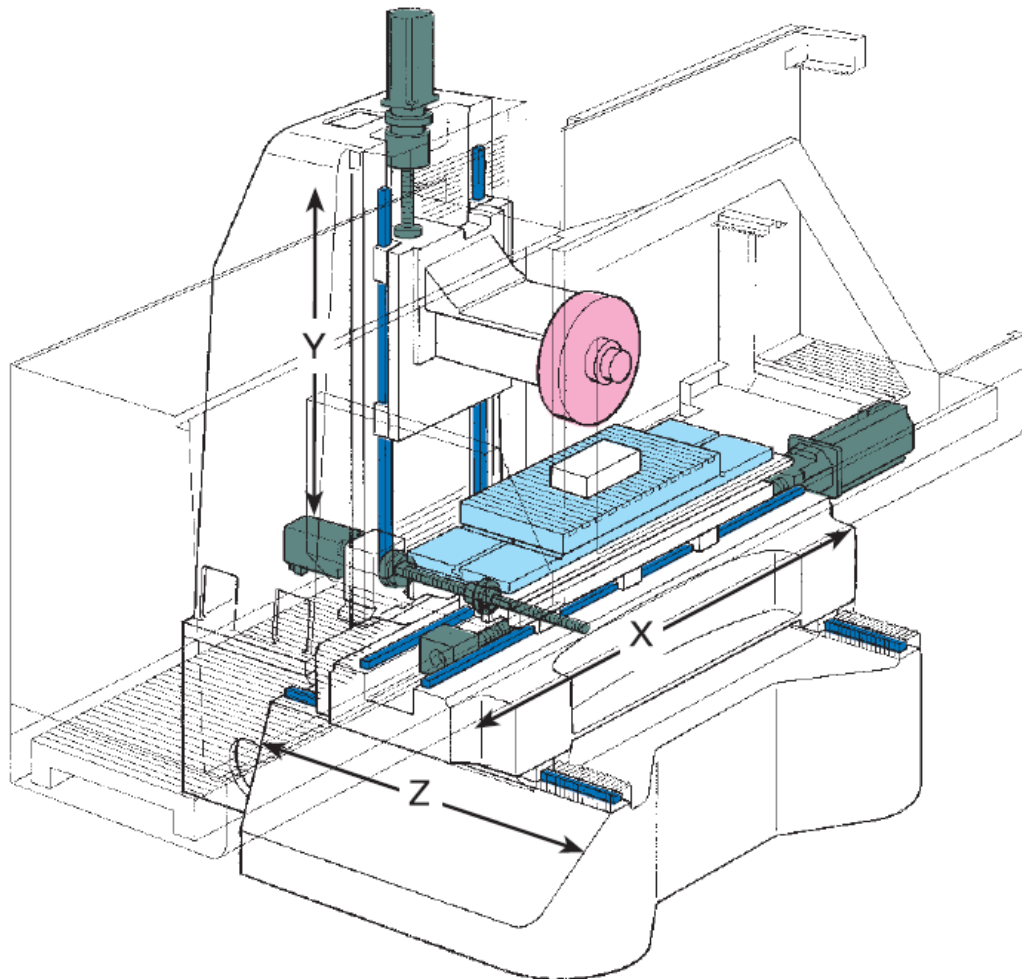


Slika 22. Primjer dubokog brušenja [14]

Ponekad, ukoliko brus nije dovoljno porozan da bi mogao svojom reznom površinom prenjeti iz zahvata ukupnu količinu materijala, potrebno je odvoditi odvojene čestice sa površine brusa. To se može izvesti dovođenjem sredstva za hlađenje direktno na brusnu ploču pod visokim pritiskom koje će odstraniti odvojene čestice, a drugi način je kontinuirana obrada rezne površine brusa u toku samog procesa brušenja.

Da bi se proces mogao kvalitetno odvijati, u toku samog procesa potrebno je dovoditi velike količine SHIP-a, a ujedno jako je važno da ono bude i pravilno usmjereno. Za to služe različite sapnice koje se konstruiraju ovisno o obliku obratka. U toku samog procesa skida se velika količina materijala i odvodi zajedno sa sredstvom za hlađenje. Ta se smjesa, prije nego se vrati natrag u spremnik, treba filtrirati kako bi se naknadno dobilo sredstvo bez onečišćenja.

Osim velike snage brusilice zahtjeva se i velika krutost stroja kako bi se održala oštrost brusa i kako bi se mogla postići kvaliteta proizvoda. Mnogi elementi utječu na performanse stroja, no najkritičnije su vodilice stroja jer su najviše izložene trošenju. Važno je također da lijevana konstrukcija bude kvalitetno konstruirana sa ciljem smanjenja vibracija. Na slici 23 prikazana je brusilica za duboko brušenje .



Slika 23. Brusilica za duboko brušenje [15]

Proces dubokog brušenja razvio se za potrebe automobilske i avio industrije u obradi teškoobradivih materijala. Razvojem računalom upravljanih strojeva, danas je moguće ovim postupkom izrađivati vrlo složene oblike sa visokom preciznošću, ali i sa velikom proizvodnošću.

## 2.2. VISOKOBRZINSKO BRUŠENJE

Visokobrzinsko brušenje je postupak brušenja s povećanim brzinama rezanja u odnosu na klasično brušenje. Brzine rezanja se kreću i do 120 m/s. Dubina brušenja i brzina obradne površine nešto je veća nego kod klasičnog brušenja što povećava proizvodnost. Karakteristike brušenja s povećanom brzinom rezanja, kao posljedica povećanja obodne brzine brusa, mogu se opisati pomoću srednje površine presjeka odvojene čestice,  $h_{pr}$ , čiji izraz glasi :

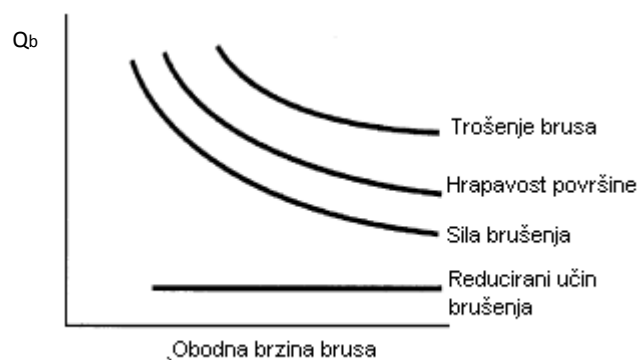
$$h_{pr} = \frac{v_o}{v_b} \cdot \frac{1}{N_s} \cdot \sqrt{\frac{a_p}{D_e}} \quad (3)$$

gdje su:

- $v_o$  – brzina obradne površine;
- $v_b$  – obodna brzina brusa;
- $N_s$  – statički broj oštrica;
- $a_p$  – dubina brušenja;
- $D_e$  – ekvivalentni promjer brusa;

Prethodni izraz prikazuje da se povećanjem obodne brzine brusa smanjuje presjek odvojene čestice. Smanjenjem presjeka odvojene čestice smanjuju se i sile brušenja što pozitivno utječe na sam proces brušenja.

Kvalitativne karakteristike postupka brušenja s povećanom brzinom rezanja, uz uvjet brušenja s konstantnim reduciranim učinkom brušenja prikazuje slika 24.



Slika 24. Karakteristike brušenja uz povišenje brzine rezanja [16]

Da bi se mogle koristiti visoke brzine, vibracije moraju biti minimalne što zahtjeva visoku krutost i točnost sustava *brus-vreteno-motor*. Uz to, stroj treba imati posebne uređaje za dobavljanje sredstva za hlađenje koji omogućuju probijanje zračnog filma koji se stvara oko brusa zbog velike frekvencije vrtnje.

Brušenje s povećanim brzinama rezanja najveću primjenu našlo je kod brušenja cilindričnih predmeta. Na slici 25 prikazana je visokobrzinska kružna brusilica za obradu bez šiljaka.

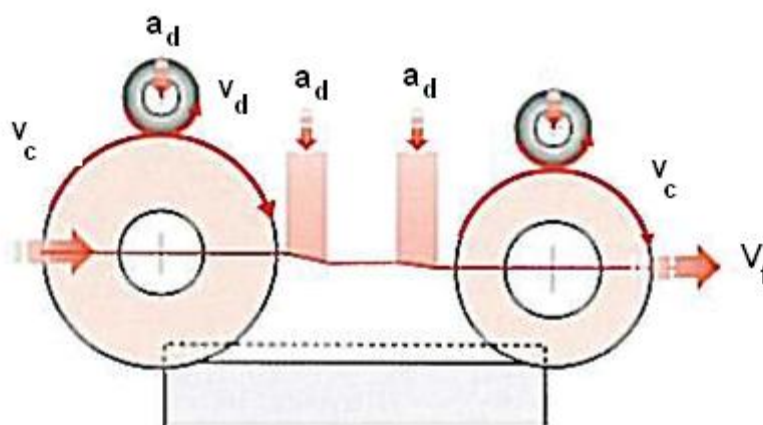


Slika 25. Visokobrzinska kružna brusilica za obradu bez šiljaka [17]

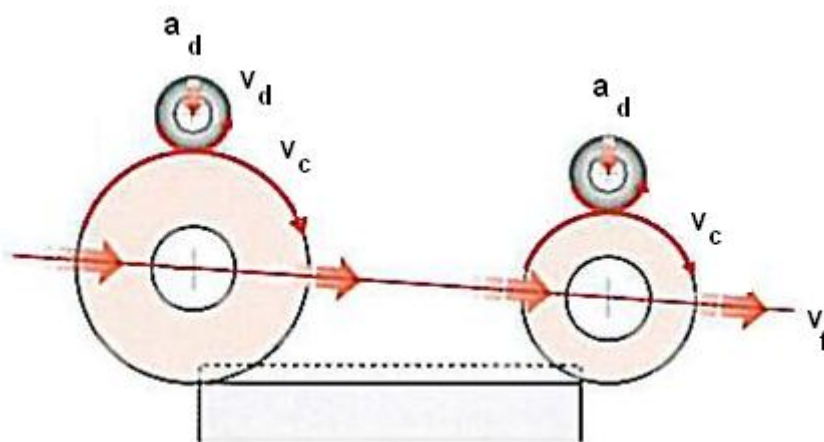
Karakteristika ovog stroja je velika produktivnost koja je omogućena povećanom brzinom rezanja. Kod ovog stroja brzina rezanja je 50m/s, a koristi se za izradu različitih okruglih predmeta u automobilske industriji, avio-industriji i pri izradi ostalih visokopreciznih rotacijskih dijelova.

## 2.3. BRUŠENJE SA KONSTANTNOM OBRADOM REZNE POVRŠINE

Duboko brušenje sa konstantnom obradom rezne površine brusa (Continuous Dress Grinding) najčešće se koristi kod izrade različitih složenih profila. Stalnom obradom rezne površine brusa ne mijenja se topografija brusa, što rezultira konstantnim uvjetima brušenja. Nema prekida procesa radi obrade rezne površine brusa što proces čini učinkovitijim od prethodnog. Reznju površina se obrađuje dijamantnom rolicom. Njome se dobije tražena geometrija i oštrost brusa. Rolica se nalazi iznad brusa, a može se vrtiti u oba smjera. Ako se vrti u istom smjeru kao i brusna ploča onda je to sinkrona obrada rezne površine, a u suprotnome smjeru asinkrona obrada rezne površine brusa. Dubina obrade rezne površine je oko  $0,4\text{--}1\text{ }\mu\text{m}$  po jednom okretaju brusa. Na slikama 26 i 27 prikazana su dva postupka obrade rezne površine brusa. Prvi prikazuje diskontinuirani postupak obrade tijekom procesa kada se rolica spušta i obrađuje brus u pravilnim vremenskim razmacima, dok je drugi postupak kontinuirani tijekom cijelog procesa.



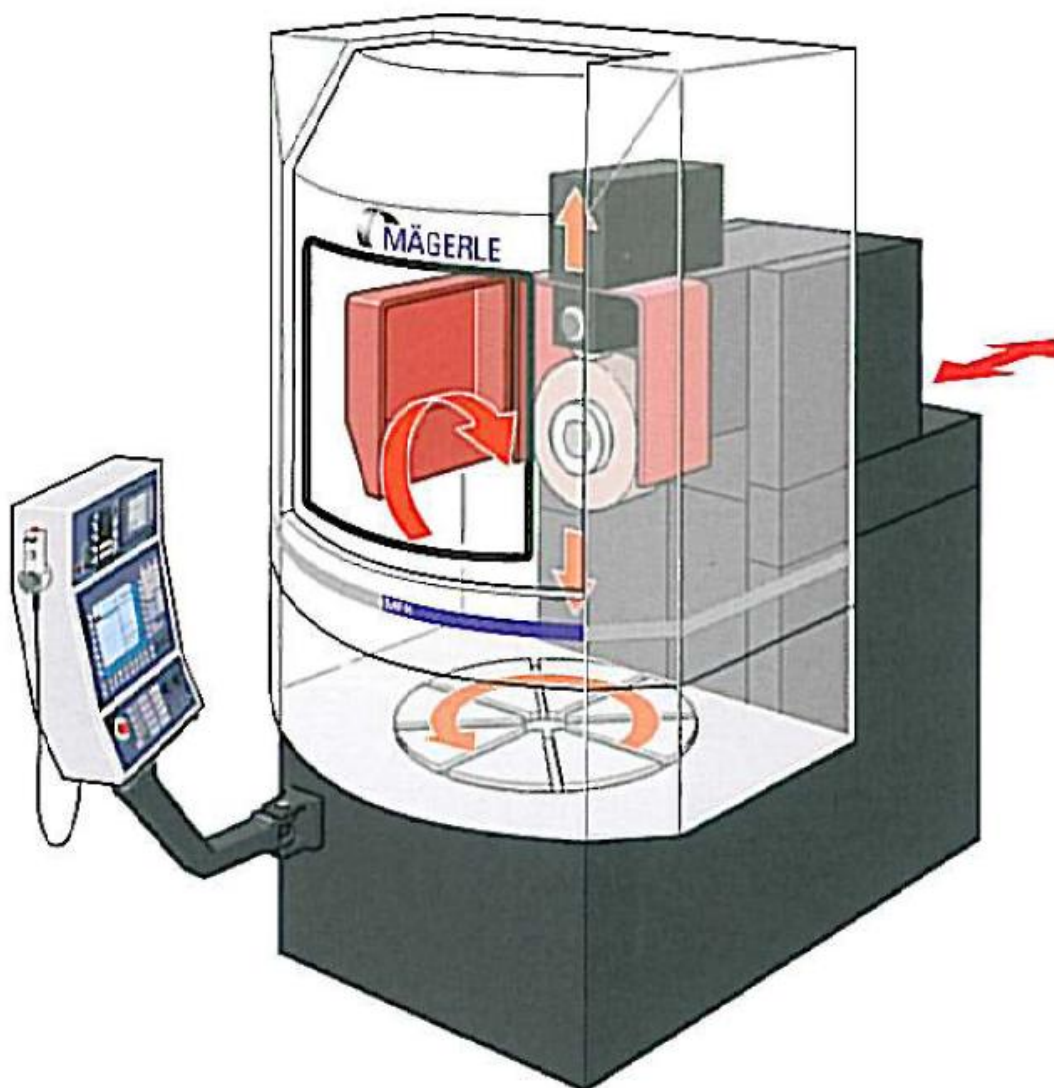
Slika 26. Diskontinuirana obrada reznom rolicom [14]



Slika 27. Kontinuirana obrada reznom rolicom [14]



Prednosti postupka brušenja s konstantnom obradom rezne površine brusa su: visoki učin brušenja, konstantna otvorena i oštra struktura brusa tijekom cijelog procesa brušenja, točnost izrade profilnih predmeta, manja potrebna snaga, manje razvijanje topline, mogućnost obrade dugih predmeta.



Slika 28. Karuselna brusilica sa konstantnom obradom rezne površine brusa [15]

Na slici 28 prikazana je numerički upravljana karuselna brusilica sa kontinuiranom obradom rezne površine brusa.

Nedostatak ovog postupka su što je za svaki specifični predmet potrebna odgovarajuća specifična rezna rolica, uz to stalnom obradom brusa povećana je potrošnja brusne ploče i same dijamantne rolice.



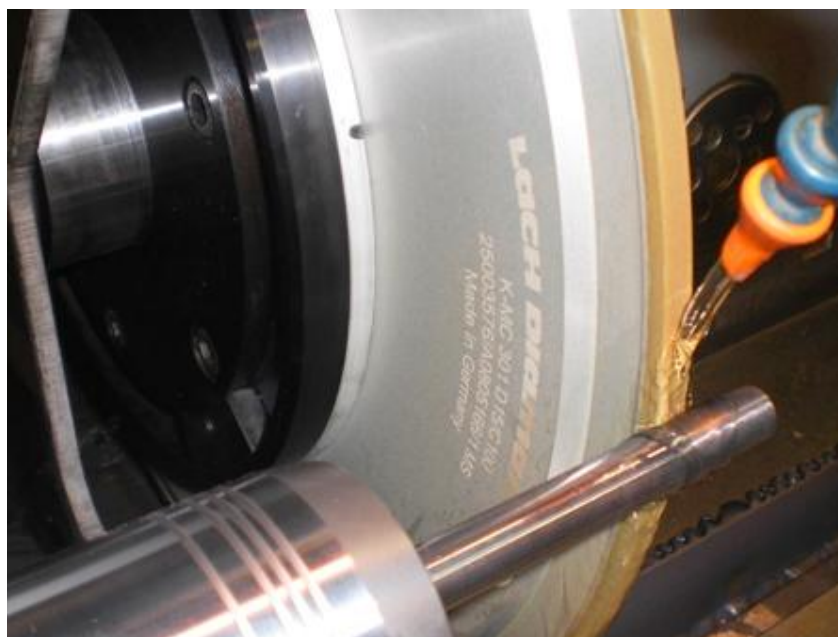
## 2.4. VISOKOBRZINSKO BRUŠENJE SUPER-ABRAZIVIMA

Visokobrzinsko brušenje superabrazivima kubičnim bor-nitridom (CBN) i polikristaličnim dijamantom (PCD) karakteristično je po vrlo visokim brzinama rezanja, preko 300m/s. Povećanjem brzine rezanja smanjuje se presjek odvojene čestice što rezultira smanjenjem sila brušenja. Uz to kod CBN bruseva mnogo je više zrna u zahvatu nego kod konvencionalnih bruseva što također doprinosi smanjenju trošenja brusa i povećava kvalitetu obrađene površine.

Sa povećanjem brzine rezanja također se povećava glavna sila brušenja pa je potrebno dovoditi više snage, a i povećava se količina topline u zoni brušenja. Kako bi se smanjila toplina u zoni brušenja potrebno je smanjiti vrijeme kontakta između zrna i obratka, a to vrijeme moguće je smanjiti povećanjem brzine rezanja. Maksimalna brzina rezanja kojom je moguće izvoditi proces određena je graničnom frekvencijom vrtnje brusne ploče.

Zbog velikih frekvencija vrtnje osnova brusne ploče je metalna, a na nju se galvaniziranjem ili nekim drugim postupkom nanosi sloj kubičnog bornitrida ili polikristaličnog dijamanta. Granična brzina vrtnje određena je vezivom. Smolna veziva koriste se kod najmanjih brzina vrtnje do 140m/s dok za najveće brzine vrtnje koriste se jednoslojni galvanizirani brusevi koji mogu raditi na brzinama većim od 300m/s.

Da bi se sam proces visokobrzinskog brušenja, slika 29, mogao efikasno izvoditi, sustav *brus-vreteno-motor* mora biti veoma precizan i bez vibracija. Uz to sustav treba imati dinamički uređaj za balansiranje brusne ploče koji tokom procesa uravnotežuje brus kako ne bi došlo do vibracija.



Slika 29. Visokobrzinsko brušenje [18]

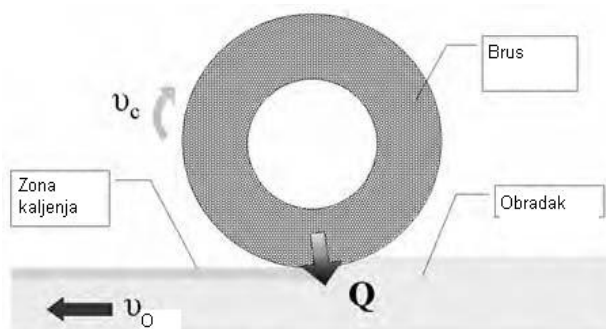
## 2.5. VISOKOUČINSKO BRUŠENJE

Visokoučinsko brušenje je kombinacija dubokog i visokobrzinskog brušenja, a karakterizirano je prednostima i jednog i drugog postupka. Karakteristika procesa je uklanjanje velike količine materijala i postizanje završne točnosti koristeći odjednom visoke brzine rezanja, relativno malu brzinu obratka i veliku dubinu rezanja. Uz to proces je efikasniji jer je manji utrošak specifične energije. Temperatura u zoni brušenja je smanjena u odnosu na ostale postupke jer se velika količina topline odvede iz zone brušenja zajedno sa odvojenim česticama. Kao alat se koriste jednoslojni superabrazivni brusevi (CBN i PCD) koji omogućavaju brzine rezanja 300 m/s. Osnova bruseva često je metalna, a u novije vrijeme istražuje se upotreba kompozitne osnove iz razloga manjeg toplinskog istezanja i manje mase samog brusa.

Za vrijeme samog procesa potrebno je dovoditi SHIP pod visokim pritiskom u zonu brušenja kako bi se odvodila nastala toplota i uklonile odvojene čestice s rezne površine brusa.

## 2.6. KALJENJE BRUŠENJEM

Kaljenje brušenjem (grind-hardening) je specijalni proces brušenja koji može odjednom zakaliti obradak jednako dobro kao i postići kvalitetnu završnu obradu, slika 30. Trenje koje se javlja kod brušenja u ovom procesu je od presudne važnosti jer ono razvija toplinu. Ta toplota najvećim dijelom prelazi na obradak pa kao posljedicu hlađenja obradka dobijemo kaljenu površinu.



Slika 30. Grind-hardening postupak brušenja [19]

Rezultat procesa kaljenje-brušenjem može se kvantificirati po *tvrdoći površine* koja ovisi o udjelu ugljika u materijalu i brzini hlađenja, te po *dubini prodiranja tvrdoće* koja ovisi o materijalu i količini topline predane obratku. Prema samoj potrebi odabire se koja je karakteristika važnija, te tako se planira postupak kaljenja brušenjem.

Pošto se proces najčešće izvodi suhim brušenjem, obradak treba biti takvih dimenzija da na sebe brzo može primiti toplinu koja se razvija brušenjem, odnosno postupak je moguć kod masivnijih proizvoda. Ta brzina hlađenja treba biti brža od kritične brzine hlađenja za pojedini materijal. Najveću pozornost treba dati pravilnom odabiru parametara obrade kako bi proizveli dovoljno topline u zoni brušenja koja će omogućiti toplinsku obradu, a to su brzina rezanja, brzina obratka, dubina rezanja, materijal obratka i vrsta brusa.

### 3. SREDSTVA I UVJETI ISPITIVANJA

U ovom poglavlju su dane osnovne karakteristike sredstava i uvjeta ispitivanja, sa naznakom osnovnih zahtjeva koji za provedbu postupka obodnog istosmjernog ravnog dubokog brušenja i istraživanje graničnog učina brušenja moraju biti ispunjeni.

#### 3.1. BRUSILICA

Za provedbu ispitivanja korištena je brusilica za ravno obodno brušenje STANKO IMPORT "Krasni borec" Model 3B71M , koja je prikazana na slici 31.



Slika 31. Brusilica za ravno obodno brušenje, Stanko Import

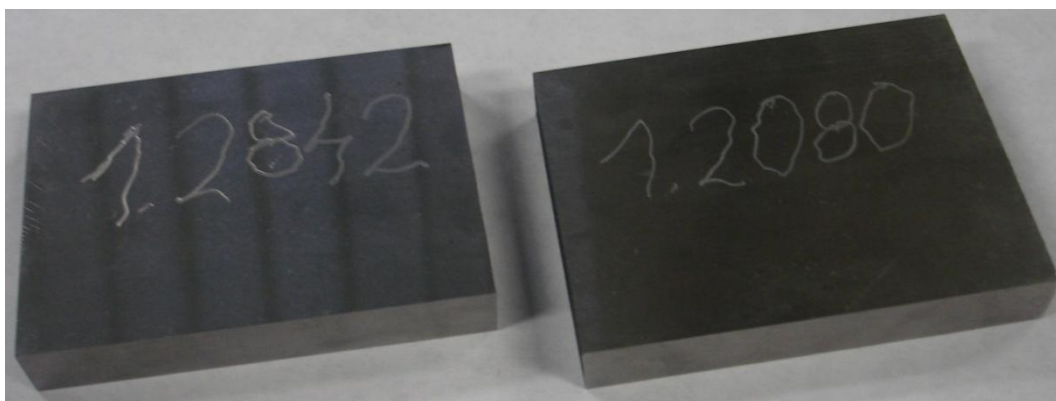
Osnovne tehničko-tehnološke karakteristike brusilice za ravno obodno brušenje na kojoj je izvođeno eksperimentalno istraživanje prema literaturi [20] su slijedeće:

dužina magnetnog stola	540 mm;
širina magnetnog stola	200 mm;
visina brušenja:	
do magnetnog stola	235 mm;

do stola brusilice	350 mm;
dimenzije brusa:	
max. vanjski promjer	250 mm
min. vanjski promjer	150 mm
max. širina brusa	25 mm
unutarnji promjer	76 mm
brzina uzdužnog gibanja stola	0,2 - 8 m/min
brzina poprečnog gibanja stola	0,01 - 1,5 m/min
snaga elektromotora	1,7 kW;
frekvencija vrtnje elektromotora	3000 min <sup>-1</sup> ;
frekvencija vrtnje glavnog vretena	2700 min <sup>-1</sup> ;
širina brusilice	1500 mm;
dužina brusilice	1500 mm;
visina brusilice	2300 mm

### 3.2. IZBOR MATERIJALA UZORAKA

Za istraživanje graničnog učina brušenja izabrana su dva materijala W. Nr. 1.2842 i W. Nr. 1.2080 koji pripadaju grupi alatnih čelika za rad u hladnom stanju. Uzorci materijala prikazani na slici 32 dobijeni su iz četvrtastih profila 100 x 15 mm izrezanih na dužinu 65 mm.



Slika 32. Uzorci

Prema [21] svojstva izabranih materijala uzoraka su:

*Materijal 1.)* W. Nr. 1.2842 ( Č 3840)- je dimenzijski postojan alatni čelik za rad u hladnom stanju. Primjenu nalazi kod izrade različitih alata za štancanje, probijanje, narezivanje navoja, kod izrade alata za drvnu, papirnu i metalnu industriju, za izradu mjernih uređaja te alata za plastičnu deformaciju. Kemijski sastav čelika dan je u Tablici 1.

Tablica 1. Prosječni kemijski sastav čelika 1.2842

C %	Si %	Mn %	Cr %	V %
0,90	0,25	2,00	0,35	0,10

Toplinska obrada navedenog uzorka vršila se na temperaturi od 820 °C te hlađenjem u ulju. Naknadno je izvršeno popuštanje na temperaturi od 200°C u trajanju 1h. Nakon tako provedene toplinske obrade tvrdoća uzorka iznosi približno 59HRc.

*Materijal 2.)* W. Nr. 1.2080 ( Č 4150)- je standardni ledeburitni dimenzijski postojan alatni čelik sa visokim postotkom kroma (12%) i za rad u hladnom stanju. Primjenu nalazi kod izrade različitih alata za štancanje i probijanje, za izradu noževa za papirnu, drvenu i plastičnu industriju, za mjerne alate. Kemijski sastav čelika dan je u Tablici 2.

Tablica 2. Prosječni kemijski sastav čelika 1.2080

C %	Si %	Mn %	Cr %	V %
2.00	0,25	0,35	11,50	-

Toplinska obrada navedenog uzorka vršila se na temperaturi od 970 °C te hlađenjem u ulju. Naknadno je izvršeno popuštanje na temperaturi od 200°C u trajanju 1h. Nakon tako provedene toplinske obrade tvrdoća uzorka iznosi približno 61HRc.

### 3.3. IZBOR BRUSNE PLOČE

Za istraživanje graničnog učina brušenja izabran je brus za ravno obodno brušenje firme SWATY iz Maribora. Namjenjen je za srednje grubo brušenje kaljenog čelika, a oznaka brusa je:

#### **2A46/3 I 9V32**

2A.....plemeniti bijeli korund  
46/3.....srednja veličina zrna  
I.....tvrdoća mekana  
9.....otvorena struktura  
V.....keramičko vezivo  
32.....interna oznaka veziva

Dimenzije brusa:

Ø185 x 25 x Ø76 mm

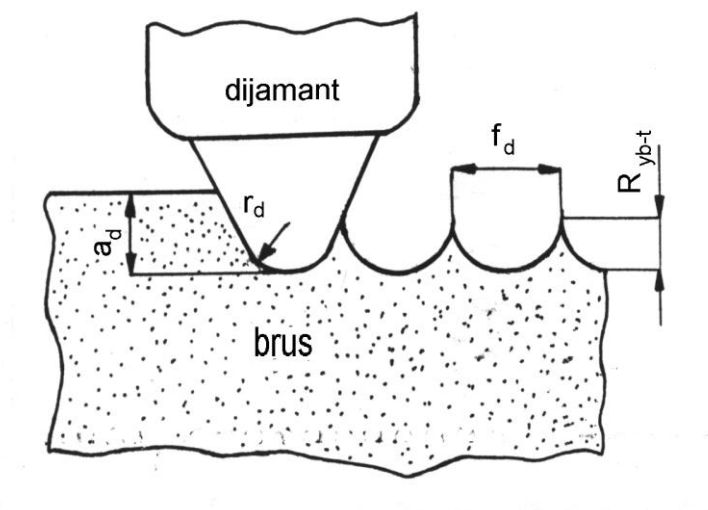
Pošto kod brusilica nije moguće regulirati frekvenciju vrtnje glavnog vretena obodna brzina je konstantna i iznosi:

$$v_b = D\pi n = 0,185 \cdot \pi \cdot 2700 = 1568,92m/min = 26,14m/s$$

### 3.4. OBRADA REZNE POVRŠINE BRUSA

Za obradu rezne površine brusa odabran je dijamant od 2 ct, radijusa oštice 0,3 mm. Tim dijamantom izvedena je obrada rezne površine brusa u ispitivanju i to tako da se jednoreznim dijamantom prelazi jedanput preko rezne površine brusa izabranom vrijednošću posmaka dijamanta  $f_d$ . Dubina prodiranja dijamanta je konstantna i iznosi  $a_d = 0,1$  mm.

Dobijena topografija rezne površine brusa obrađene jednoreznim dijamantom, prema [13] može se opisati teoretskom najvećom hrapavosti rezne površine brusa, koja je prikazana na slijedećoj slici:



Slika 33. Teoretska najveća hrapavost rezne površine brusa [13]

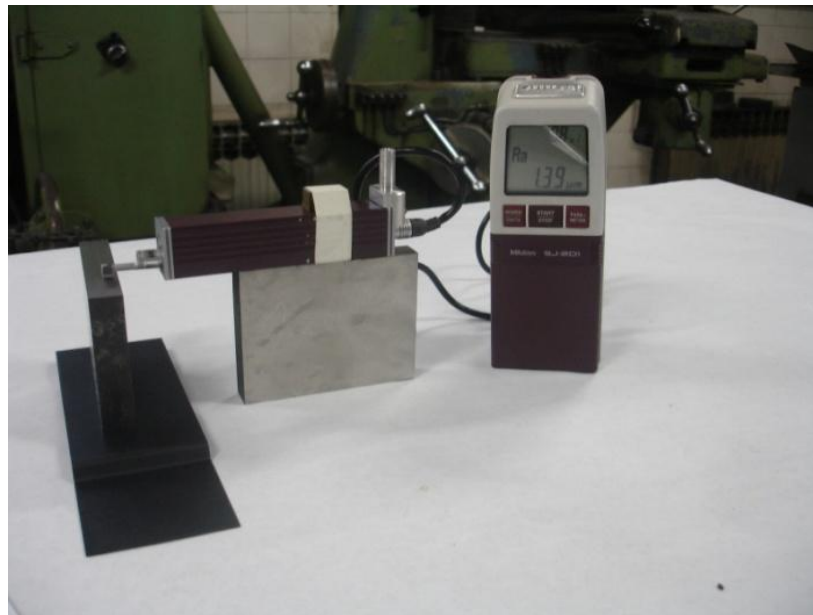
Sa slike 33 je vidljivo da teoretska najveća hrapavost rezne površine brusa ovisi o posmaku i radijusu dijamanta, a prema [13] se izračunava iz slijedećeg izraza:

$$R_{yb-t} = \frac{f_d^2}{8 \cdot r_d} \quad (4)$$

Dakle, u eksperimentalnom istraživanju je grublja rezna površina brusa, veća vrijednost  $R_{yb-t}$ , ostvarena većom vrijednošću posmaka dijamanta  $f_d$  i obrnuto, fina rezna površina brusa je određena malom vrijednošću  $R_{yb-t}$ , tj. malim posmakom dijamanta  $f_d$ .

### 3.5. UREĐAJ ZA MJERENJE HRAPAVOSTI

Površinska hrapavost je sveukupnost mikrogeometrijskih nepravilnosti na površini predmeta (koje su mnogo puta manje od površine cijelog predmeta), a prouzrokovane su postupkom obrade ili nekim drugim utjecajem. Kod eksperimenta mjerit će se srednje aritmetičko odstupanje mjernog profila ( $R_a$ ) ili uobičajeniji naziv srednja aritmetička hrapavost. Hrapavost će se mjeriti prenosivim uređajem Mitutoyo SJ-201 prikazanim na slici 34.



Slika 34. Uređaj za mjerenje hrapavosti

Radi veće točnosti rezultata mjernje hrapavosti izbrušene površine uzorka se izvodilo tri puta te se računala aritmetička sredina.



## 4. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE

Eksperimentalno istraživanje se izvodi u dva dijela, odnosno biti će dva eksperimenta. . U Eksperimentu A se izvrši vrlo gruba obrada rezne površine brusa, te za istu traži granični reducirani učin brušenja i to na dva načina. Jedan način je zadržavanje konstantne posmične brzine brušenja uz povećavanje dubine brušenja. Dubina brušenja povećava se do one granice kada se počinju javljati vizualne greške brušenja. To znači da će za te uvjete rada, odnosno za taj stroj, materijal, brusnu ploču, količinu rashladnog sredstva... granični učin brušenja biti onaj koji uz maksimalnu dubinu brušenja još neće prouzročiti nikakve vidljive greške na površini obratka. Drugi način je zadržavanje konstantne dubine brušenja, a povećavanje posmične brzine brušenja isto do krajnjih granica, tražeći granični učin brušenja.

U drugom dijelu eksperimentalnog istraživanja, Eksperiment B, rezna površina brusa se obradi vrlo fino, te se za istu traži granični reducirani učin brušenja na oba gore opisana načina i za dva izabrana materijala obratka.

Rezna površina brusa se obrađuje prije svakog novog ulaska brusa u zahvat istim parametrima kako bi se zadržavala relativno jednaka topografija brusa, odnosno brus u svaki novi zahvat ulazi čist i oštar.

### 4.1. ODREĐIVANJE GRANIČNE PROIZVODNOSTI SA VRLO GRUBOM REZNOM POVRŠINOM BRUSA, EKSPERIMENT A

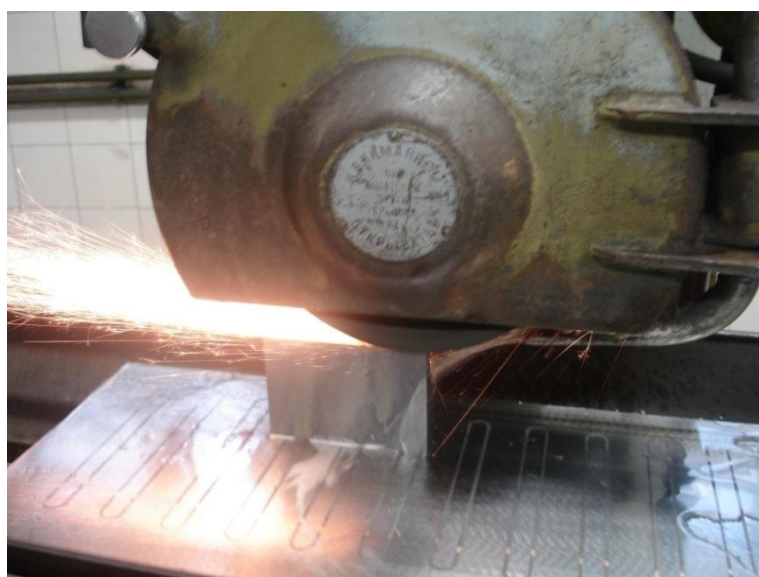
Da bi se dobila gruba rezna površina brusa, obrada brusa se prema poglavlju 3.4 vrši jednoreznim dijamantom u jednom prolazu uz obilno hlađenje slijedećim parametrima:

Dubina prodiranja dijamanta:  $a_d = 0,1mm$

Posmična brzina dijamanta:  $v_d = 1,5m/min$

#### 4.1.1. Određivanje granične proizvodnosti uz uvjet konstantne posmične brzine s mijenjanjem parametara dubine brušenja, POKUS 1A

Prvi način eksperimenta se izvodi zadržavajući konstantnu posmičnu brzinu obratka  $v_o = 1,75 \text{ m/min}$ , a mijenja se parametar dubine brušenja  $a_p$ . Proces se izvodi istosmjernim brušenjem koje rezultira manjim silama što omogućava bolje režime rada. U početku se kreće sa manjim dubinama, te se kroz eksperiment povećavaju do krajnjih granica. Obradak se steže na stol stroja pomoću magnetne ploče, slika 35, a pri većim dubinama osigurava se sa prednje strane kako ne bi došlo do pomicanja.



Slika 35. Stezanje obratka na stol brusilice

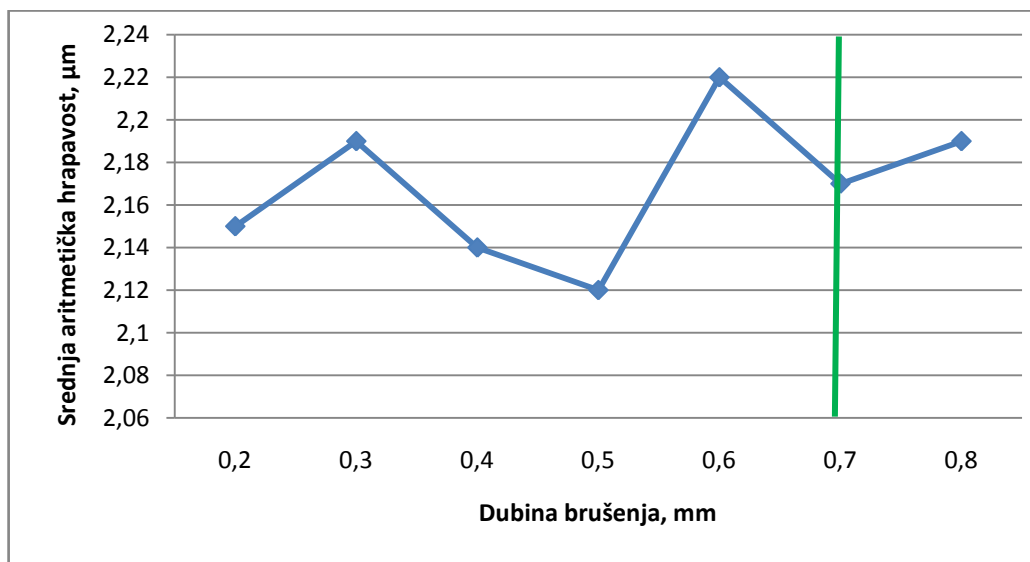
Nakon provedenoga postupka brušenja na dva prethodno izabrana materijala obratka dobiveni su rezultati prikazani u Tablici 3.

Tablica 3. Srednja aritmetička hrapavost uz konstantnu posmičnu brzinu i promjenjivu dubinu brušenja

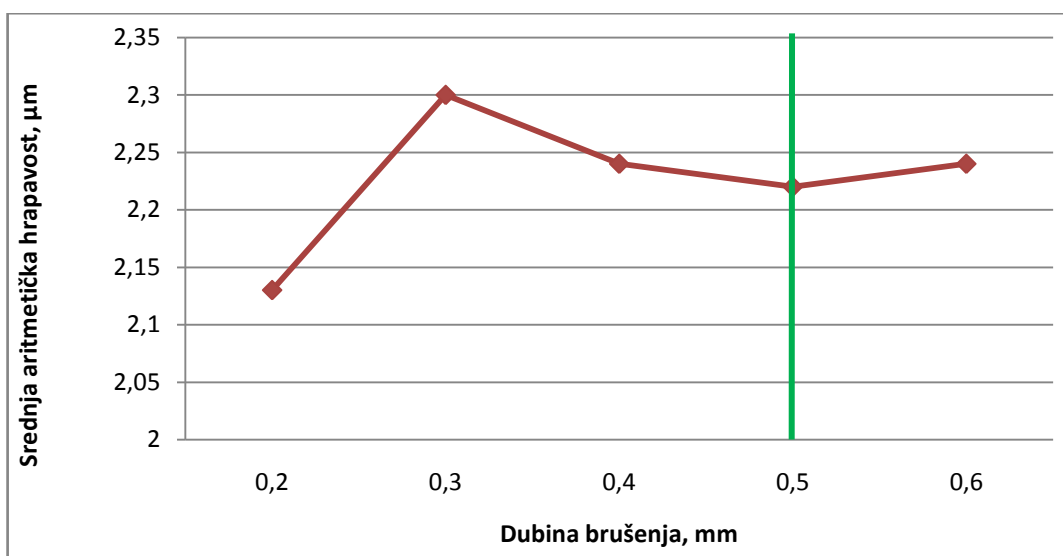
Materijal: 1.2842 $v_o = 1,75 \text{ m/min}$	
$a_p$ , mm	$R_a$ , $\mu\text{m}$
0,2	2,15
0,3	2,19
0,4	2,14
0,5	2,12
0,6	2,22
0,7	2,17
0,8	2,19

Materijal: 1.2080 $v_o = 1,75 \text{ m/min}$	
$a_p$ , mm	$R_a$ , $\mu\text{m}$
0,2	2,13
0,3	2,30
0,4	2,24
0,5	2,22
0,6	2,24
0,7	-

Prema tablici 3 napravljeni su dijagrami srednje aritmetičke hrapavosti u ovisnosti o dubini brušenja, slika 36 i 37. Na temelju dijagrama može se vidjeti da je područje srednje aritmetičke hrapavosti približno konstantno što znači da hrapavost površine ne ovisi o dubini brušenja, a vrijednost srednje aritmetičke hrapavost iznosi približno  $Ra \approx 2,2 \mu\text{m}$ .



Slika 36. Granična proizvodnost 1.2842 čelika pri konstantnoj posmičnoj brzini od 1,75 m/min

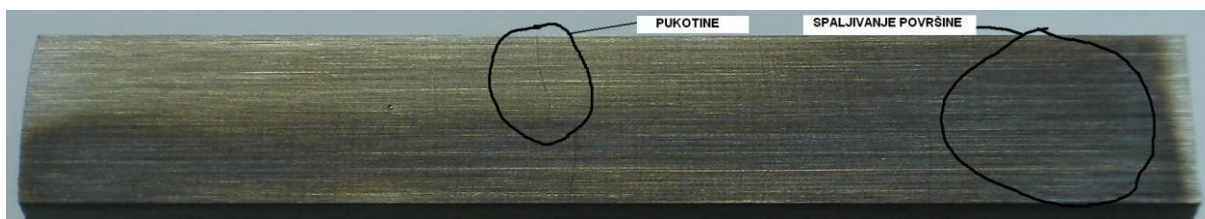


Slika 37. Granična proizvodnost 1.2080 čelika pri konstantnoj posmičnoj brzini od 1,75 m/min

U dijagramima je ucrtana okomita zelena linija koja predstavlja graničnu dubinu brušenja za zadane uvjete. To znači da se lijevo od te linije nalazi područje kod kojeg se ne javljaju greške brušenja vidljive prostim okom, slika 38, a desno od te linije javljaju se greške brušenja, slika 39.



Slika 38. Površina obratka materijala 1.2842 bez pogreška brušenja



Slika 39. Površina obratka materijala 1.2842 sa pogreškama brušenja

Na slici 39 vidljivo je pojava pukotina na površini obratka, uz to još je vidljivo spaljivanje površine koje je najintenzivnije pri izlasku brusne ploče iz obratka. Spaljivanje površine obratka pri izlasku brusne ploče iz zahvata standardni je problem kod dubokog brušenja, pogotovo kada se brušenje izvodi blizu granice proizvodnosti. Razlog spaljivanja je nekontrolirano dovođenje sredstva za hlađenje u zonu brušenja. Zračni film koji se stvara oko brusa rasprši dio sredstva za hlađenje koji inače dospije u zonu brušenja jer se sapnica za dovod sredstva za hlađenje više ne nalazi iznad obratka. Da bi se spriječila ta pojava potrebno je ujednačiti dovod sredstva za hlađenje tokom cijelog procesa, a to se može izvesti dodavanjem novog predmeta iza obratka. Taj predmet treba biti nešto niži od obratka kako ga brusna ploča na bi zahvatila pri izlasku iz obratka, a služio bi za usmjeravanje sredstva za hlađenje u zonu brušenja. Širina predmeta ovisi o konstrukcije stroja, odnosno udaljenosti sapnice od osi vrtnje glavnog vretena. Što je sapnica bliže osi vrtnje brusa to je potrebna širina predmeta manja i obrnuto.

Kao što slike 38 prikazuje površinu obratka materijala 1.2842 bez pogreške brušenja, a slika 39 prikazuje površinu obratka materijala 1.2842 sa vidljivim pogreškama, tako se je i za materijal 1.2080 odredila granična dubina brušenja kod koje se još nisu počele javljati greške. I na materijalu 1.2080 su se javile pukotine i karakteristično spaljivanje površine obratka.

Na temelju graničnih dubina brušenja prikazanih na slikama 36 i 37 pomoću izraza za reducirani učin brušenja računa se granična proizvodnost brušenja za pojedini materijal i zadane uvjete.

Za čelik 1.2842 granični reducirani učin brušenja iznosi:

$$Q_{br-gr} = a_p \cdot v_o = 0,0007 \cdot 1,75 = 0,001225 m^3 / minm = 20,41 mm^3 / smm$$

Za čelik 1.2080 granični reducirani učin brušenja iznosi:

$$Q_{br-gr} = a_p \cdot v_0 = 0,0005 \cdot 1,75 = 0,000875 m^3 / m \min = 14,58 mm^3 / mms$$

Usporedbom ta dva podatka vidljivo je da je granični reducirani učin brušenja čelika 1.2842 veći od graničnog reduciranog učina brušenja čelika 1.2080 za 28%. Prema tome se može zaključiti da je uz postojeće uvjete obradivost čelika 1.2842 bolja iako se radi o istoj skupini čelika.

#### 4.1.2. Određivanje granične proizvodnosti uz konstantnu dubinu brušenja s mijenjanjem posmične brzine; POKUS 2A

U drugom dijelu eksperimenta dubina brušenja je bila konstantna i iznosila je  $a_p = 0,25$  mm, a povećavala se posmična brzina  $v_0$ . Isto kao i u prvom dijelu eksperiment je izvođen istosmjernim načinom brušenja, a obradu rezne površine jednozrnatim dijamantom s parametrima obrade istim kao i u prethodnom eksperimentu:

$$a_d = 0,1 mm$$

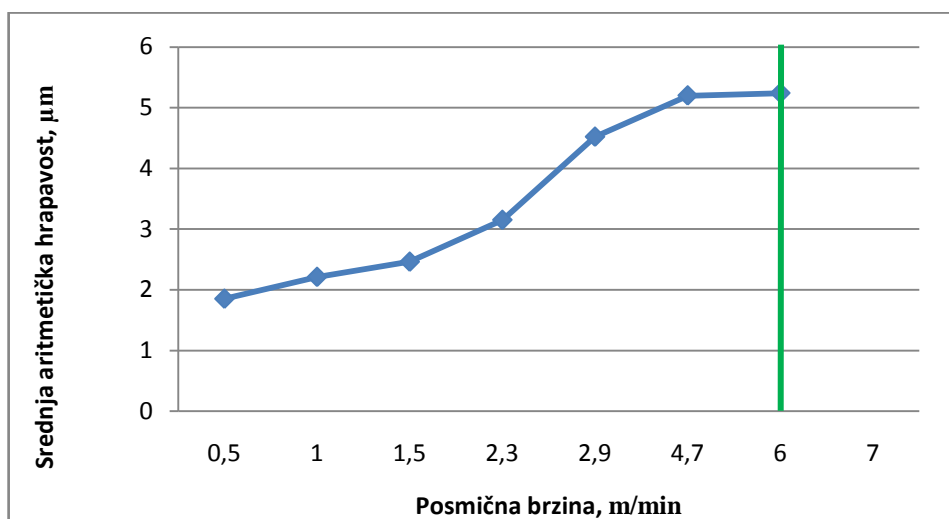
$$v_d = 1,5 m / \min$$

Nakon provedenoga postupka brušenja mjerenjem hrapavosti obrađene površine dobiveni su rezultati dani u Tablici 4.

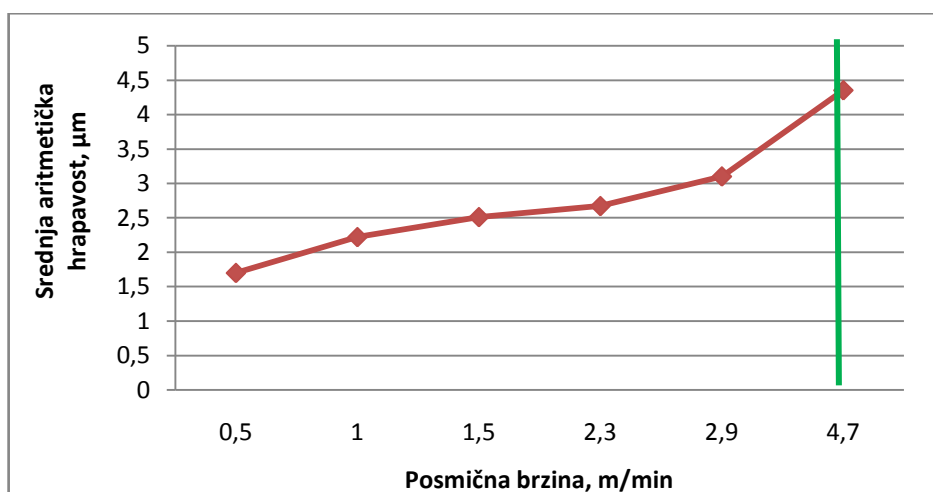
Tablica 4. Srednja aritmetička hrapavost uz konstantnu dubinu brušenja i promjenjivu posmičnu brzinu brušenja

Materijal: 1.2842 $a_p = 0,25 mm$		Materijal: 1.2080 $a_p = 0,25 mm$	
$v_0$ , m/min	$R_a$ , $\mu m$	$v_0$ , m/min	$R_a$ , $\mu m$
0,5	1,85	0,5	1,70
1	2,21	1	2,22
1,5	2,46	1,5	2,51
2,3	3,15	2,3	2,67
2,9	4,52	2,9	3,10
4,7	5,20	4,7	4,35
6	5,24	6	-
7	-	7	-

Podaci iz tablice 4. prikazani su grafički za čelik 1.2842 na slici 34, te za čelik 1.2080 na slici 35.



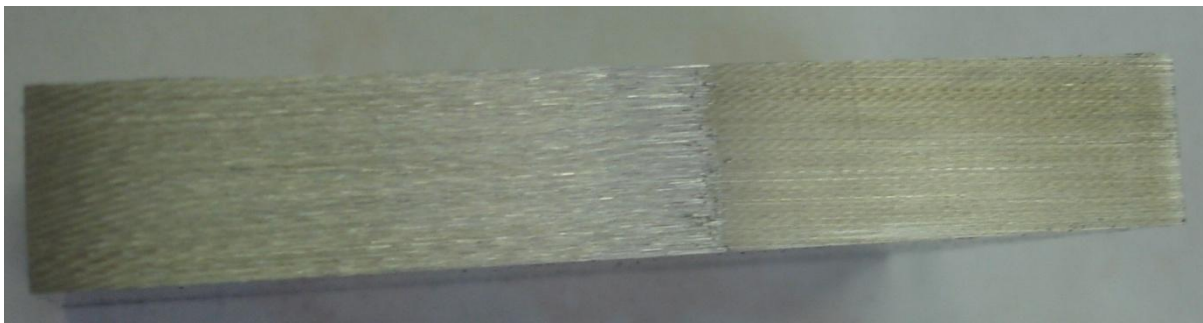
Slika 40. Granična proizvodnost pri konstantnoj dubini brušenja i promjenjivoj posmičnoj brzini za čelik 1.2842



Slika 41. Granična proizvodnost pri konstantnoj dubini brušenja i promjenjivoj posmičnoj brzini za čelik 1.2080

Vidljivo je iz slika 40 i 41 da srednja aritmetička hrapavost raste s porastom posmične brzine obratka i obrnuto, pri manjim vrijednostima posmične brzine obratka vrijednost srednje aritmetičke hrapavosti je manja. Prema tome može se zaključiti da hrapavost obrađene površine ovisi o posmičnoj brzini obratka.

U slikama 40 i 41 zelenom linijom ucrtana je granična posmična brzina brušenja koja je u ovom slučaju određena snagom brusilice. Znači lijevo od nje izvodilo se ispravno brušenja bez pogrešaka, dok se kod većih vrijednosti brus zaustavio u zahvatu sa obratkom.



Slika 42. Obradak pri najvećim režimima obrade

Na slici 42 se vidi granica na obratku gdje je stroj stao, no važno je uočiti da se prije toga nisu javile nikakve greške brušenja osim što je kvaliteta obrađene površine veoma gruba.

Na temelju graničnih posmičnih brzina obratka prikazanim na slikama 39 i 40 pomoću izraza za reducirani učin brušenja računa se granična proizvodnost brušenja za pojedini materijal i zadane uvijete.

Za čelik 1.2842 granični reducirani učin brušenja iznosi:

$$Q_{br-gr} = a_p \cdot v_0 = 0,00025 \cdot 6 = 0,0015 m^3 / min = 25 mm^3 / mm$$

Za čelik 1.2080 granični reducirani učin brušenja iznosi:

$$Q_{br-gr} = a_p \cdot v_0 = 0,00025 \cdot 4,7 = 0,001175 m^3 / min = 19,58 mm^3 / mm$$

Usporedbom dobivenih rezultata vidljivo je da granični reducirani učin brušenja materijala 1.2842 je veći nego materijala 1.2080 za 27%. To potvrđuje tezu iz prošlog pokusa da materijal 1.2842 ima bolju obradivost od materijala 1.2080.

Ako se usporede rezultati iz pokusa 1 i rezultati iz pokusa 2 uočava se razlika u rezultatima, odnosno granična proizvodnost je približno 20% veća u pokusu 2 u kojem se proizvodnost brušenja povećavala s povećanjem posmične brzine obratka. Razlog je taj što je granična proizvodnost u pokusu 2 bila određena snagom brusilice, dok je u pokusu 1 granična proizvodnost bila određena pojavom pogrešaka brušenja, a sam je stroj imao snage za izvođenje još većih dubina brušenja. Prema tome može se zaključiti da za zadane uvjete veću graničnu proizvodnost postizemo kada stroj radi sa većim pomičnim brzinama obratka, a manjim dubinama brušenja.

Nadalje, kod materijala 1.2080 primjećeno je da se kod manjih posmičnih brzina obratka javlja spaljivanje površine, dok se kod većih posmičnih brzina ta pogreška veoma smanji. To se objašnjava na način da se kod stvaranja odvojene čestice javlja elastična deformacija obratka. Elastična deformacija uzrokuje određeni pritisak na brusnu ploču, odnosno odrivnu silu koja uzrokuje trenje koje stvara toplinu. Pošto je posmična brzina mala, brusna ploča se zadržava dugo u kontaktu sa obratkom pa se razvija mnogo topline koja uzrokuje spaljivanje površine. Spaljivanje se ne bi

događalo da količina SHIP-a omogućava kvalitetno odvođenje te topline, no ono je bilo nedostatno.

Hrapavost površine u oba dijela eksperimenta veoma je gruba, posebno u drugom dijelu, i ne spada u područje hrapavosti koje se zahtjeva od brušenja. Za kvalitetniju površinu proces bi se morao raditi u dva prolaza. Prvi prolaz bi bio gruba obrada sa ciljem skidanja velike količine materijala, odnosno brušenje s prethodno određenim vrijednostima graničnih učina brušenja.

Drugi prolaz bio bi fina obrada s ciljem postizanja kvalitetne površine male hrapavosti obrađene površine uz uvjet:

Režimi obrade rezne površine brusa:

$$a_d = 0,02mm$$

$$v_d = 0,25m / min$$

Dubina završnog brušenja i posmična brzina :

$$a_p = 0,02mm$$

$$v_0 = 1,6m / min$$

Uz te uvjete dobila se srednja aritmetička hrapavost  $Ra = 0,42\mu m$  za čelik 1.2842 i  $Ra = 0,45$  za čelik 1.2080. Ta kvaliteta obrađene površine sada zadovoljava kriterije koji se očekuju od brušenja.

## **4.2. ODREĐIVANJE GRANIČNE PROIZVODNOSTI SA FINO OBRAĐENOM REZNOM POVRŠINOM BRUSA, EKSPERIMENT B**

Obrada brusa ponovno vrši se jednoreznim dijamantom u jednom prolazu uz obilno hlađenje. Kod fino obrađene rezne površine brusa dubina prodiranja dijamanta je ista kao kod grube obrade brusa, ali je posmična brzina dijamanta 5 puta manja. Parametri obrade kod fine obrade rezne površine brusa su:

Dubina prodiranja dijamanta:  $a_d = 0,1mm$

Posmična brzina dijamanta:  $v_d = 0,3m / min$



#### 4.2.1. Određivanje granične proizvodnosti uz uvjet konstantne posmične brzine s mijenjanjem parametara dubine brušenja, POKUS 1B

Prvi način eksperimenta se izvodi isto kao i u prethodnom pokusu zadržavajući konstantnu posmičnu brzinu obratka  $v_0 = 1,75 \text{ m/min}$ , a mijenja se parametar dubine brušenja  $a_p$ . Proces se isto izvodi istosmjernim brušenjem koje rezultira manjim silama što omogućava bolje režime rada. U ovom dijelu eksperimenta maksimalna dubina brušenja je mnogo manja pa se eksperiment izvodio s drugačijim dubinama rezanja nego u prvom dijelu.

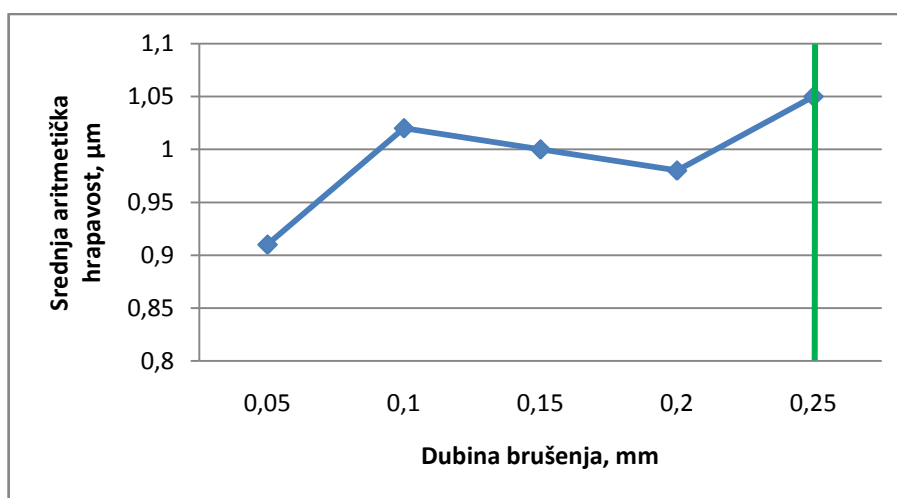
Nakon provedenoga postupka dobiveni su rezultati koji su prikazani u Tablici 5.

Tablica 5. Srednja aritmetička hrapavost uz konstantnu posmičnu brzinu i promjenjivu dubinu brušenja

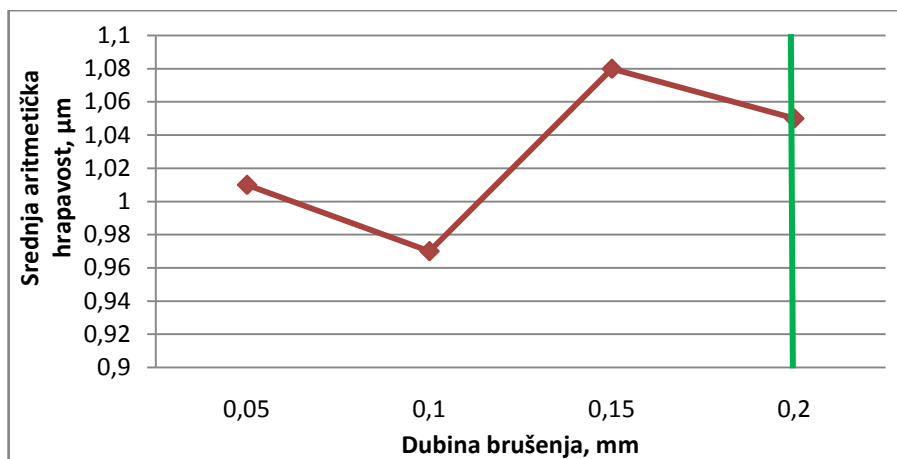
Materijal: 1.2842 $v_o = 1,75 \text{ m/min}$	
$a_p$ , m/min	$R_a$ , $\mu\text{m}$
0,05	0,91
0,1	1,02
0,15	1,00
0,2	0,98
0,25	1,05

Materijal: 1.2080 $v_o = 1,75 \text{ m/min}$	
$a_p$ , m/min	$R_a$ , $\mu\text{m}$
0,05	1,01
0,1	0,97
0,15	1,08
0,2	1,05
0,25	-

Prema tablici 5 napravljeni su dijagrami srednje aritmetičke hrapavosti u ovisnosti o dubini brušenja, slika 43 i 44. Na temelju dijagrama može se vidjeti da je područje srednje aritmetičke hrapavosti isto kao i u eksperimentu A približno konstantno i iznosi  $1,02 \mu\text{m}$ , što potvrđuje znači da hrapavost površine ne ovisi o dubini brušenja.



Slika 43. Granična proizvodnost 1.2842 čelika pri konstantnoj posmičnoj brzini od  $1,75 \text{ m/min}$



Slika 44. Granična proizvodnost 1.2080 čelika pri konstantnoj posmičnoj brzini od 1,75 m/min

Isto kao i u eksperimentu A ucrтана je okomita zelena linija u grafovima koja označava graničnu dubinu brušenja, a određena je greškama brušenja za oba materijala obratka. To znači lijevo od te linije se nalazi područje kod kojeg se ne javljaju greške brušenja vidljive prostim okom, a desno od te linije javljaju se greške brušenja.

Na temelju graničnih dubina brušenja prikazanih na slikama 43 i 44 pomoću izraza za reducirani učin brušenja računa se granična proizvodnost za pojedini materijal i zadane uvjete.

Za čelik 1.2842 granični reducirani učin brušenja iznosi:

$$Q_{br-gr} = a_p \cdot v_0 = 0,00025 \cdot 1,75 = 0,0004375 m^3 / minm = 7,3 mm^3 / smm$$

Za čelik 1.2080 granični reducirani učin brušenja iznosi:

$$Q_{br-gr} = a_p \cdot v_0 = 0,00020 \cdot 1,75 = 0,00035 m^3 / minm = 5,83 mm^3 / smm$$

Usporedbom dobivenih rezultata vidljivo je da granični reducirani učin brušenja materijala 1.2842 veći nego materijala 1.2080 za 25 %. To ponovno potvrđuje da materijal 1.2842 ima bolju obradivost od materijala 1.2080.

Ukoliko se usporede dobiveni podaci iz poglavlja 4.1.1. i poglavlja 4.2.1. uočava se razlika je u samoj vrijednosti srednje aritmetičke hrapavosti koja je manja u Eksperimentu B kada je površina brusa bila finije obrađena što je bilo i za očekivati. No, najvažniji podatak je i taj da je granična proizvodnost brušenja manja zato jer je izračunati granični reducirani učin brušenja skoro 3 puta manji u ovom eksperimentu. Dakle, sa grublje obrađenim brusom, a istim ostalim parametrima brušenja mogu se postići znatno veće vrijednosti učina brušenja.

#### 4.2.2. Određivanje granične proizvodnosti uz konstantnu dubinu brušenja s mijenjanjem posmične brzine, POKUS 2B

U drugom dijelu Eksperimenta B dubina brušenja je bila konstantna i iznosila je  $a_p = 0,125 \text{ mm}$ , a povećavala se posmična brzina  $v_0$ . Dubina brušenja je smanjena dvostruko u odnosu na prvi eksperiment iz razloga što s većim dubinama nije bilo moguće izvesti postupak brušenja. Isto kao i u prvom dijelu pokusu proces se izvodi istosmjernim načinom brušenja, a obradu rezne površine jednozrnatim dijamantom s istim parametrima obrade kojim se dobije fino obrađena rezna površina brusa:

$$a_d = 0,1 \text{ mm}$$

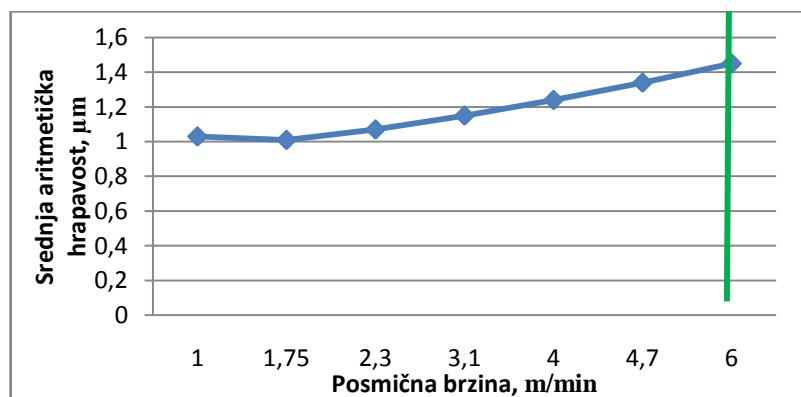
$$v_d = 0,3 \text{ m/min}$$

Nakon provedenoga postupka brušenja mjerenjem hrapavosti obrađene površine dobiveni su rezultati dani u Tablici 6.

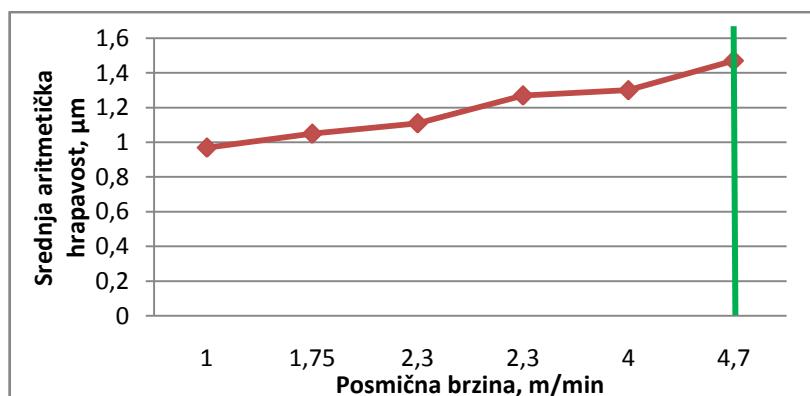
Tablica 6. Srednja aritmetička hrapavost uz konstantnu dubinu brušenja i promjenjivu posmičnu brzinu brušenja

Materijal: 1.2842 $a_p = 0,125 \text{ mm}$		Materijal: 1.2080 $a_p = 0,125 \text{ mm}$	
$v_0$ , m/min	$R_a$ , $\mu\text{m}$	$v_0$ , m/min	$R_a$ , $\mu\text{m}$
1,00	1,03	1,00	0,97
1,75	1,01	1,75	1,05
2,30	1,07	2,30	1,11
3,10	1,15	3,10	1,27
4,00	1,24	4,00	1,30
4,70	1,34	4,70	1,47
6,00	1,45		

Podaci iz tablice 6. prikazani su grafički za čelik 1.2842 na slici 45, te za čelik 1.2080 na slici 46.



Slika 45. Granična proizvodnost pri konstantnoj dubini brušenja i promjenjivoj posmičnoj brzini za čelik 1.2842



Slika 46. Granična proizvodnost pri konstantnoj dubini brušenja i promjenjivoj posmičnoj brzini za čelik 1.2080

Iz slika 45 i 46 vidljivo je da i kod Eksperimenta B srednja aritmetička hrapavost raste sa povećanjem posmične brzine obratka što je bio i slučaj kada se radilo sa grubo obrađenim brusom. Porast vrijednosti srednje aritmetičke hrapavosti je u ovom eksperimentu ipak znatno manji jer je rezna površina brusa fino obrađena, a ona se zapravo kod brušenja koje se odvija u jednom prolazu preslikava na obradak.

U slikama 45 i 46 ucrtana je okomita zelena linija koja označava graničnu posmičnu brzinu brušenja za oba materijala koja je u ovom slučaju određena snagom brusilice. Znači lijevo od nje izvodilo se ispravno brušenja bez pogrešaka, dok se kod većih vrijednosti kao i u Eksperimentu A brus zasutavio u zahvatu sa obratkom.

Na temelju tih graničnih posmičnih brzina brušenja pomoću izraza za reducirani učin brušenja računa se granična proizvodnost za zadane uvjete.

Za čelik 1.2842 granični reducirani učin brušenja iznosi:

$$Q_{br-gr} = a_p \cdot v_0 = 0,000125 \cdot 6 = 0,00075 m^3 / minm = 12,5 mm^3 / smm$$

Za čelik 1.2080 granični reducirani učin brušenja iznosi:

$$Q_{b-gr} = a_p \cdot v_0 = 0,000125 \cdot 4,7 = 0,0006 m^3 / minm = 10 mm^3 / smm$$

Na temelju dobivenih rezultata za graničnu proizvodnost primjećuje se da je granična proizvodnost materijala 1.2842 veća od granične proizvodnosti materijala 1.2080 za 25%. Ta pojava se događala u svim pokusima pa se može sa sigurnošću potvrditi da materijal 1.2842 ima bolju obradivost od materijala 1.2080 za zadane uvjete.

Ukoliko se usporede dobiveni rezultati u poglavlju 4.1.2. sa rezultatima iz poglavlja 4.2.2. uočava se razlika u samoj vrijednosti srednje aritmetičke hrapavosti koja je manja u drugom eksperimentu kada je površina brusa bila finije obrađena što je bilo i za očekivati. No, najvažniji podatak je i taj da je granični reducirani učin brušenja 2 puta manji u ovom eksperimentu. Dakle, sa grublje obrađenim brusom, a istim

ostalim parametrima brušenja mogu se postići znatno veće vrijednosti učina brušenja.

Isto kao i u Eksperimentu A tako i u ovom eksperimentu granična proizvodnost je veća u drugom pokusu kada je dubina brušenja bila konstantna, a povećavala se posmična brzina obratka odnosno kada je granična proizvodnost bila određena snagom brusilice. To potvrđuje da se na ovom stroju uz zadane uvjete dobije veća granična proizvodnost kada se radi sa većim posmičnim brzinama obratka, a manjim dubinama brušenja.

Kako bi se lakše snalazilo među rezultatima dobivenih ovim istraživanjem napravljena je tablica 7 sa cjelokupnim pregledom graničnih reduciranih učina brušenja u ovisnosti o parametrima obrade.

Tablica 7. Granični reducirani učini brušenja dobiveni istraživanjem

	Parametri obrade:	Materijal:	Granični reducirani učin brušenja, mm <sup>3</sup> /smm:
<b>Gruba obrada brusa, EKSPERIMENT A</b>	$a_p = \text{promjenjiv}$ $v_0 = \text{konst.}$ POKUS 1A	1.2842	<b>20,4</b>
		1.2080	<b>14,6</b>
	$a_p = \text{konst.}$ $v_0 = \text{promjenjiv}$ POKUS 2A	1.2842	<b>25,0</b>
		1.2080	<b>19,6</b>
<b>Fina obrada brusa, EKSPERIMENT B</b>	$a_p = \text{promjenjiv}$ $v_0 = \text{konst.}$ POKUS 1B	1.2842	<b>7,3</b>
		1.2080	<b>5,8</b>
	$a_p = \text{konst.}$ $v_0 = \text{promjenjiv}$ POKUS 2B	1.2842	<b>12,5</b>
		1.2080	<b>10,0</b>

## 5. ZAKLJUČAK

Provedenim istraživanjem pokazalo se da parametri obrade rezne površine brusa utječu na povećanje proizvodnosti brušenja i na graničnu proizvodnost brušenja na način da se finije obrađenom brusnom površinom postiže manja granična proizvodnost brušenja u odnosu na grublje obrađenu brusnu površinu s kojom se postiže veća granična proizvodnost uz sve ostale iste parametre.

Nadalje, pokazano je da se sa istim brusom može postići veoma gruba površina obratka, a nasuprot tome i veoma fina površina obratka ovisno o tome kako se obradi rezna površinu brusa. Grubo obrađena površina koristila bi se za skidanje velikih količina materijala dok bi se finije obrađena rezna površinom brusa trebala koristiti za skidanje manje količine materijala i završno postizanje tražene hrapavosti. Vezano na to, pokazano je da srednja aritmetička hrapavost obrađene površine ne ovisi o dubini brušenja, tj. uz konstantnu posmičnu brzinu obratka površinska hrapavost je približno jednaka bez obzira na dubinu brušenja jer se površina brusa kod brušenja u jednom prolazu preslikava na površinu obratka. S druge strane srednja aritmetička hrapavost ovisi o posmičnoj brzini obratka, tj. uz konstantnu dubinu brušenja površinska hrapavost obrađene površine raste s povećanje posmične dubine obradka za iste uvjete.

U poglavljima 4.1.2 i 4.2.2 pokazalo se da se za iste zadane uvjete postiže veći učin brušenja sa povećanom posmičnom brzinom obradka, odnosno da se na konkretnoj brusilici postižu veće vrijednosti granične proizvodnosti brušenja ako se postupak izvodi manjim dubinama brušenja a povećanim posmičnim brzinama obratka.

Rezultati ovog eksperimentalnog istraživanja vode na zaključak da izabrani materijali obradaka, bez obzira na to što se nalaze u istoj grupi alatnih čelika, imaju drugačiju graničnu proizvodnost a time i drugačiju obradivost. Tako se prema dobivenim rezultatima iz Eksperimenta A može zaključiti da je bolje je obradiv materijal 1.2842 jer ima u prosjeku 28% veću vrijednost granične proizvodnosti brušenja od materijala 1.2080. Rezultati iz Eksperimenta B, gdje je rezna površina brusa bila finije obrađena, potvrđuju bolju obradivost čelika 1.2842 jer je njegov granični reducirani učin brušenja približno 25% veći.

## 6. LITERATURA

- [1] Machine Tool Industry German by VDW, Current statistics
- [2] Predavanja FSB
- [3] M. Sakakura, S. Tsukamoto, T. Fujiwara, I. Inasaki, Visual Simulation of Grinding Proces, Japan
- [4] R. Cebalo, Duboko brušenje, Školska knjiga, Zagreb 1990
- [5] Katalog Swaty
- [6] Katalog Noritake
- [7] [www.cuttingtoolengineering.com](http://www.cuttingtoolengineering.com)
- [8] M.J. Jackson, C.J. Davis, M.P. Hitchiner, B. Mills, High-speed grinding with CBN grinding wheels-application and future technology, Elsevier 2000
- [9] Katalog Rappold
- [10] Katalog Reishauer
- [11] Katalog Elb-Schliff
- [12] [www.winter-diamantwerkz-saint-gobain.de](http://www.winter-diamantwerkz-saint-gobain.de)
- [13] D. Ciglar, Doprinos istraživanju graničnih uvjeta brušenja, Disertacija, Zagreb 2008
- [14] G. Guo, M. Campomanas, D. McIntosh, C. Bacze, T. Green, Optimization of ContinousDress Creep-Feed Form Grinding Process, USA
- [15] [www.grinding.com](http://www.grinding.com)
- [16] J. Kopac, P. Krajnik, High-performance grinding—A review, Elsevier 2005
- [17] [www.paragons.com](http://www.paragons.com)
- [18] [www.lach-diamond.de](http://www.lach-diamond.de)
- [19] G. Chryssolouris, K. Tsirbas, K. Salonitis, An Analytical, Numerical and Experimental Approach to Grind Hardening, Journal of Manufacturing Process 2005
- [20] Upute za upotrebu brusilice
- [21] Katalog Bohler-Uddeholm